

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



TESIS DOCTORAL

Estudio sobre el secado en transporte neumático

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR

Luciano Galán Casado

DIRECTOR:

José Luis Otero de la Gándara

Madrid, 2015

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE



5322334787

T1

66.0

GAL

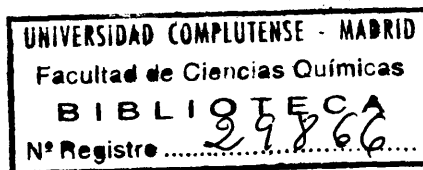
ESTUDIO SOBRE EL SECADO EN TRANSPORTE NEUMATICO

MEMORIA

que para optar al Grado de Doctor en Química Industrial

presenta

LUCIANO GALAN CASADO



Madrid, 1976

A TERESA

El presente trabajo se ha desarrollado en el Departamento de Química Técnica de la Universidad Complutense de Madrid, en la Planta Piloto, bajo la dirección del Profesor Doctor D. José Luis Otero de la Gándara, a quien quiero expresar mi más profundo agradecimiento por su estímulo y esfuerzo a lo largo de todo el tiempo que hemos trabajado juntos.

También quiero señalar mi consideración a la Fundación Juan March, que concedió una beca para Investigación de Estudios Técnicos e Industriales grupo A para la realización de esta tesis.

Muchas han sido las personas que en una manera u otra han contribuido y aportado información o experiencia durante el desarrollo del trabajo, a todas ellas expreso aquí mi gratitud.

Quiero destacar por su colaboración, la ayuda del Dr. D. Juan Antonio Trilleros en la realización de los programas para ordenadores y también mi reconocimiento para el Dr. Ingeniero D. José Ruiz, por sus sugerencias e información a la hora de efectuar el cálculo estadístico.

INDICE

Página

I. INTRODUCCION

I.1. Desarrollo actual de los procesos de secado en transporte neumático	11
I.2. Objeto del trabajo	18
I.3. Aspectos teóricos	19
I.3.1. Retención de agua por los productos ...	20
I.3.2. Mecanismos y periodos de secado	23
I.3.3. Transferencia de calor y materia en la operación de secado en transporte neumático y en lecho fluidizado	27
I.3.4. Tiempos de residencia en secaderos de transporte neumático	35
I.4. Secaderos de transporte neumático y lecho fluidizado. Analogías y diferencias	36
I.4.1. Secaderos de transporte neumático	36
I.4.2. Ventajas e inconvenientes de los secaderos de arrastre neumático	37
I.4.3. Secaderos de lecho fluidizado	38
I.4.4. Ventajas e inconvenientes de los secaderos de lecho fluidizado	38
I.4.5. Analogías y diferencia entre secaderos por arrastre neumático y lecho fluidizado	39

II. INSTALACIONES Y TECNICAS EXPERIMENTALES

II.1. Instalaciones experimentales	43
II.1.1. Descripción del equipo experimental de secado en transporte neumático	43
II.1.1.1. Sistema de alimentación	43
II.1.1.2. Columnas de secado	47
II.1.1.4. Sistema de recogida de pro- ductos	55
II.1.1.5. Regulación y registro de tem- peraturas	56
II.1.1.6. Determinación de tiempos de residencia	56
II.1.2. Descripción del equipo de lecho fluidi- zado	59
II.1.2.1. Sistema de alimentación de aire	61
II.1.2.2. Medida y regulación del cau- dal de gas	61
II.1.2.3. Calefacción	62
II.1.2.4. Placa distribudora de gas ..	62
II.1.2.5. Lecho fluidizado	63
II.1.2.6. Alimentación del producto a secar	63
II.1.2.7. Toma de muestras	63
II.1.2.8. Medida de temperaturas	64
II.2. Técnicas experimentales	64
II.2.1. Descripción de una experiencia de seca- do en transporte neumático	64
II.2.2. Descripción de una experiencia de seca- do en lecho fluidizado	67

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

III.1. Experiencias en transporte neumático	69
III.1.1. Experiencias en la columna de 100 mm de diámetro	70

	<u>Página</u>
III.1.2. Columna de 36 mm de diámetro	70
III.1.3. Tiempos de residencia	84
III.2. Experiencias en lecho fluidizado	86
 IV. DISCUSION DE LOS RESULTADOS	
IV.1. Introduucción	133
IV.2. Experiencias en transporte neumático	133
IV.2.1. Método estadístico elegido para interpretar los resultados experimentales .	141
IV.2.2. Niveles de significación. Interpretación	145
IV.2.3. Influencia de las variables estudiadas	159
IV.2.3.1. <i>Influencia del caudal de aire utilizado para el transporte neumático sobre la velocidad de secado</i>	160
IV.2.3.2. <i>Influencia de la temperatura del aire empleado para secado y transporte sobre la velocidad de secado</i>	164
IV.2.3.3. <i>Influencia del tamaño de las partículas</i>	166
IV.3. Experiencias en lecho fluidizado	172
IV.3.1. Tratamiento de los resultados experimentales	173
IV.3.2. Ajuste de los datos experimentales de variación de la temperatura con el tiempo	174
IV.3.3. Balance térmico	175
IV.3.4. Justificación del balance elegido	198
IV.3.5. Ajuste de las curvas humedad-tiempo ..	199
IV.3.6. Determinación de velocidades iniciales	199

	<u>Página</u>
IV.3.7. Análisis estadístico	199
IV.3.8. Niveles de significación. Interpretación	200
V. RESUMEN GENERAL Y CONCLUSIONES	
V.1. Introducción	225
V.2. Métodos de cálculo en el proyecto de secaderos de transporte neumático	225
V.3. Estudio crítico de los resultados experimentales obtenidos	229
V.3.1. Relación cuantitativa y cualitativa entre velocidades de secado medias en transporte neumático e iniciales en lecho fluidizado	230
V.3.2. Influencia comparativa de las variables estudiadas	231
V.3.3. Utilización de datos de secaderos de lechos fluidizados en el diseño de secaderos de transporte neumático	231
V.4. Conclusiones	232
VI. BIBLIOGRAFIA	
VI.1. Referencias del texto	235
VI.2. Libros	235
VI.3. Publicaciones	236
VI.4. Constructores de secaderos de los que han obtenido información de características de equipo	237

I. INTRODUCCION

En la operación de secado se presentan como características fundamentales para la realización del diseño de equipo:

- a) Determinar experimentalmente la velocidad de secado, ya que no es posible predecirla con garantía.
- b) Efectuar la experimentación en forma adecuada al tipo de equipo que se desea utilizar.

Esta situación general, en el caso particular del secado en transporte neumático, se agrava por la dificultad de obtención de datos cinéticos, hecho que justifica la limitada información experimental existente sobre el secado en esta variante.

En transporte neumático el secado se efectúa en un tiempo corto que se mide en segundos o fracción de segundo y en estas condiciones es improbable que los fenómenos de transferencia que tienen lugar puedan alcanzar las condiciones de régimen estacionario.

Por lo tanto, el problema de experimentación se plantea en la necesidad de medir grandes velocidades de secado, en tiempos muy cortos y en situación no estacionaria, con lo que es clara la dificultad de realización de las medidas.

Dentro de la amplia información bibliográfica que existe sobre operaciones unitarias, la operación de secado, por las circunstancias expuestas, presenta grandes lagunas, que

son consecuencia de una definición empírica de las condiciones de operación de secaderos, por las casas suministradoras de los mismos, que al disponer de instalaciones piloto, semiindustriales o prácticamente industriales, establecen las condiciones de operación con experimentación a esta escala, obteniendo en las condiciones de operación datos cinéticos medios.

En el caso particular del secado en transporte neumático, la posibilidad de experimentar a escala de laboratorio es limitada. Se precisan longitudes del tubo de arrastre neumático del orden de los 8 a 10 m, para obtener tiempos de residencia adecuados a variaciones de humedad medibles en condiciones isotermas o "cuasi" isotermas de experimentación, que permitan utilizar los datos cinéticos. Este tamaño de instalación es prácticamente industrial en lo que respecta a longitud, aunque evidentemente en la sección transversal del tubo de arrastre neumático se puede operar con diámetros pequeños.

Además de los motivos expuestos inicialmente, esta última circunstancia es otro argumento más, para justificar la falta de información sobre datos cinéticos de secado en transporte neumático.

La información para decidir la conveniencia de secar un determinado producto en transporte neumático, ha de obtenerse en una instalación de este tipo y por ello se ha considerado de interés el encontrar una técnica experimental más simple, con la que, con los medios propios de un laboratorio, se pueda estimar la posibilidad de que un producto pueda secarse en un secadero de transporte neumático.

En resumen, en el campo concreto del secado en transporte neumático, es manifiesta la falta de datos cinéticos, la dificultad de su determinación experimental, y la conveniencia de encontrar métodos experimentales que permitan obtenerlos o bien evaluar la posibilidad de que en un caso

concreto esté indicada la utilización de esta variante de la operación de secado.

Cualquier operación o proceso químico, cuando se considera en el conjunto de la industria química, presenta desde el punto de vista económico una importancia singular. En el caso de la operación de secado, como consumidora de energía presenta una exigencia mayor de un diseño correcto para obtener rendimientos térmicos elevados.

Como ejemplo que ilustra lo que acaba de exponerse, se indica que en la industria química inglesa se evaporaron en secaderos, durante el año 1970, alrededor de 10 millones de toneladas de agua, con un consumo energético de combustible equivalente a varios millones de toneladas de carbón.

I.1. DESARROLLO ACTUAL DE LOS PROCESOS DE SECADO EN TRANSPORTE NEUMATICO

La operación de secado es frecuente en los procesos de fabricación de cualquier producto. En el caso de productos finales, la eliminación de agua es fundamental, considerando las especificaciones de venta, almacenamiento y transporte.

En el caso de productos intermedios, la cantidad del agua contenida en el producto puede influir notoriamente sobre la operación del equipo, el rendimiento específico de la operación y sobre el tamaño de las instalaciones.

El actual desarrollo de los secaderos se debe más a una evolución empírica, que a consideraciones teóricas que permitan calcularlos y diseñarlos de una forma lógica y racional, con objeto de satisfacer las necesidades para que son requeridos.

En el campo concreto del secado en transporte neumático se han desarrollado modelos de secaderos de los más distintos tipos, algunos de ellos muy sofisticados, como se muestra a continuación:

En las figuras 1, 2 y 3 se representan los secaderos típicos de transporte neumático, de arrastre simple, con re circulación de sólidos y con recirculación de gas. La necesidad de tiempos de residencia superiores a los que se tienen en un solo tubo se resuelve tal como se indica en la fi gura 4, en la que puede apreciarse el diseño adecuado de las curvaturas para un arrastre conveniente del sólido.

En el dispositivo de la figura 5, se consigue calentar el gas a la salida con el gas de entrada. En la figura 6 se presenta una variante de secadero de lecho eruptivo con transporte neumático, en el que el flujo de sólido y de gas ya no puede considerarse de pistón y por ello el tiempo de residencia corresponde parcialmente a flujo de mezcla, lógi camente mayor que si se tratara únicamente de transporte neumático. Con esta última idea, en la figura 7, se repre senta un secadero de transporte neumático con varios lechos eruptivos superpuestos.

En el secadero de la figura 8, un tiempo de residencia mayor se consigue gracias a varias cámaras de expansión con turbulencia centrífuga adicional. También la cámara de expansión, puede presentar la realimentación de gruesos, que se hacen llegar al tubo de transporte neumático, tal como puede apreciarse en la figura 9.

Se puede conseguir turbulencia adicional tanto mecánicamente, (figura 10), como por placas distribuidoras de gas, (figura 11). En las figuras 12 y 13 se presenta la posible circulación de sólidos en ciclones.

Por último, en la figura 14, se da el esquema del seca dero de transporte neumático para la primera fase del seca-

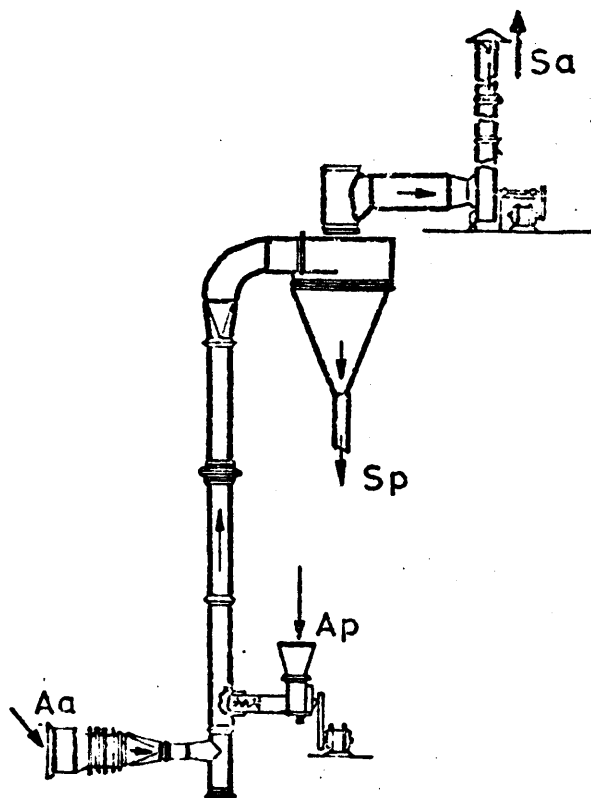


Fig. 1. Secadero de transporte neumático.

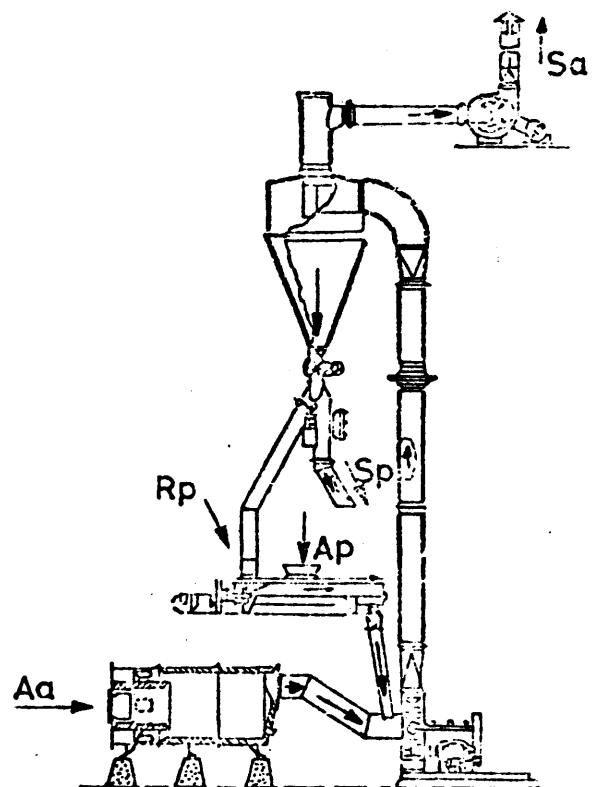


Fig. 2. Secadero de transporte neumático con recirculación.

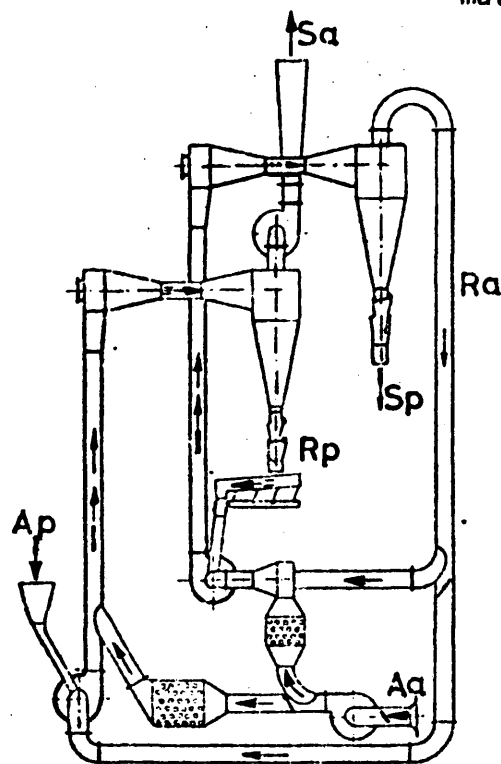


Fig. 3. Secadero de transporte neumático con dos etapas y recirculación de gas.

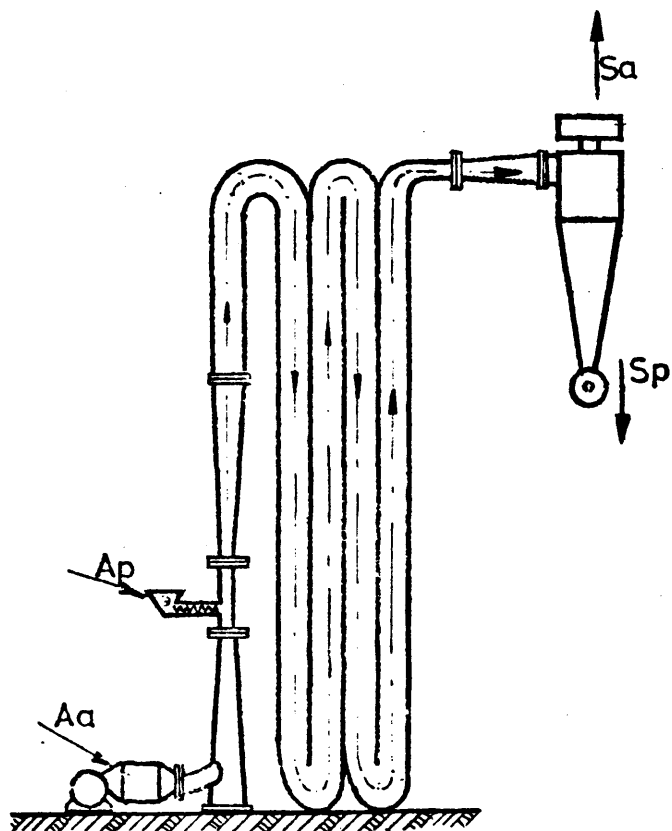


Fig. 4. Secadero de transporte neumático adaptado para aumentar el tiempo de residencia.

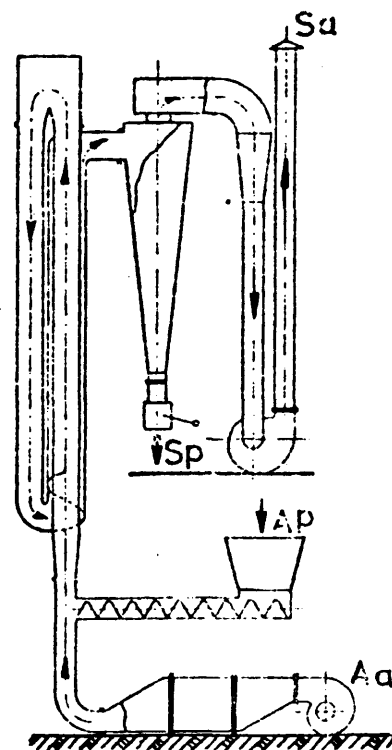


Fig. 5. Secadero de transporte neumático con recalentamiento del gas.

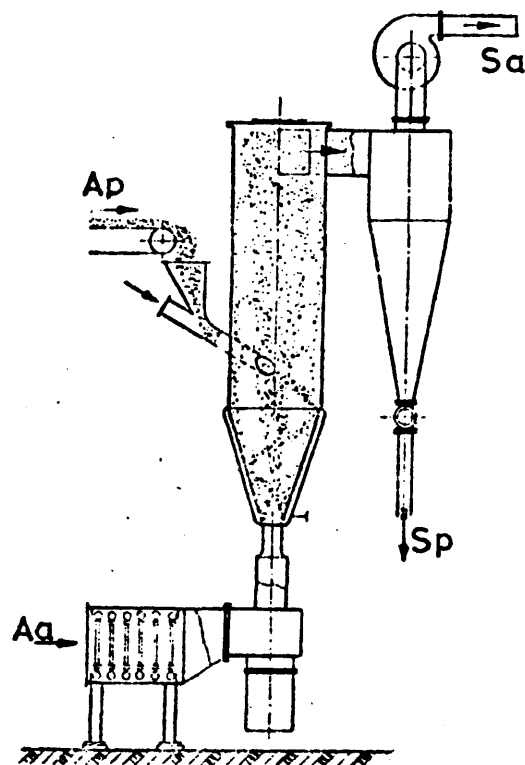


Fig. 6. Secadero de lecho eruptivo combinado con transporte neumático.

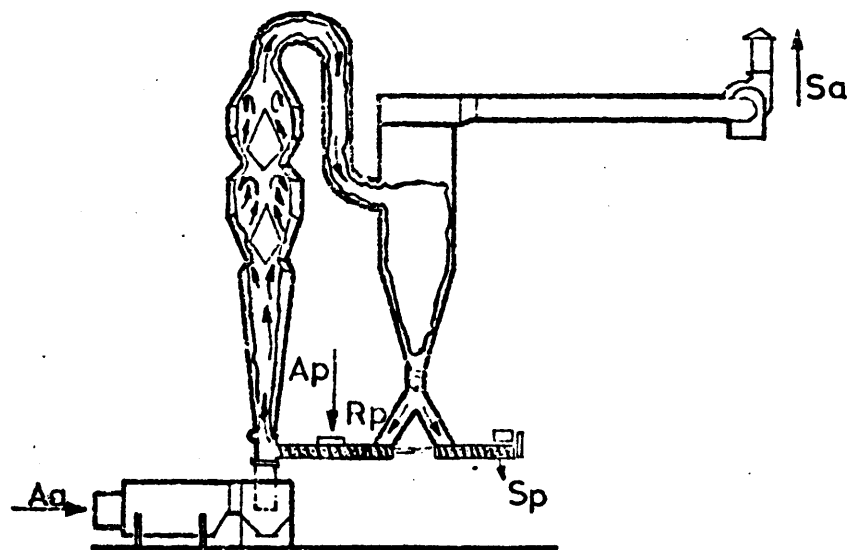


Fig. 7. Secadero de transporte neumático con lechos eruptivos.

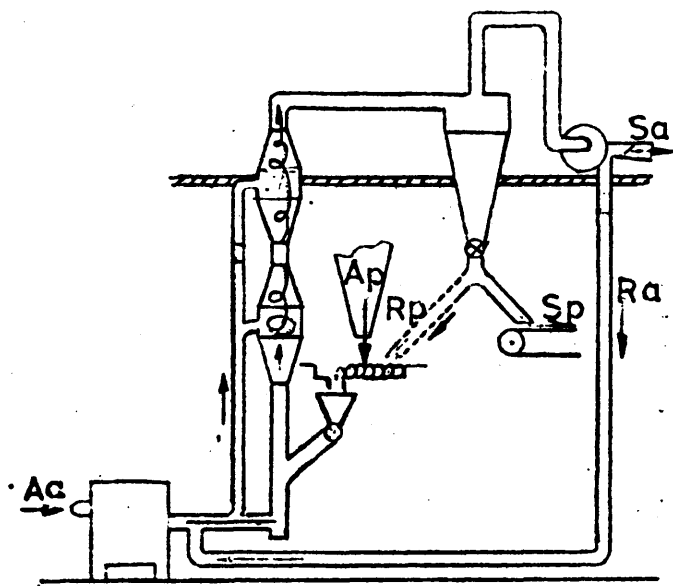


Fig. 8. Secadero de transporte neumático con turbulencia centrífuga adicional.

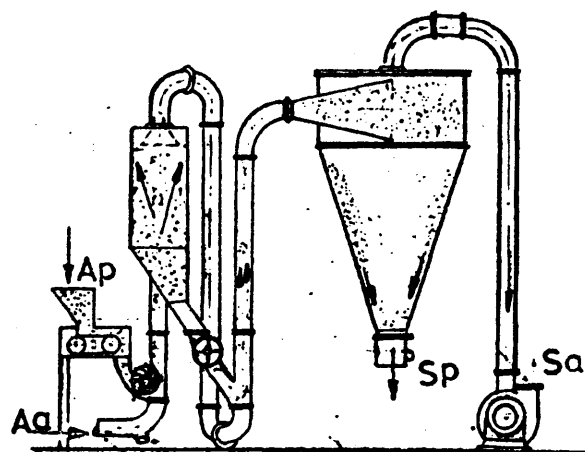


Fig. 9. Secadero de transporte neumático con cámara de expansión y realimentación de gruesos.

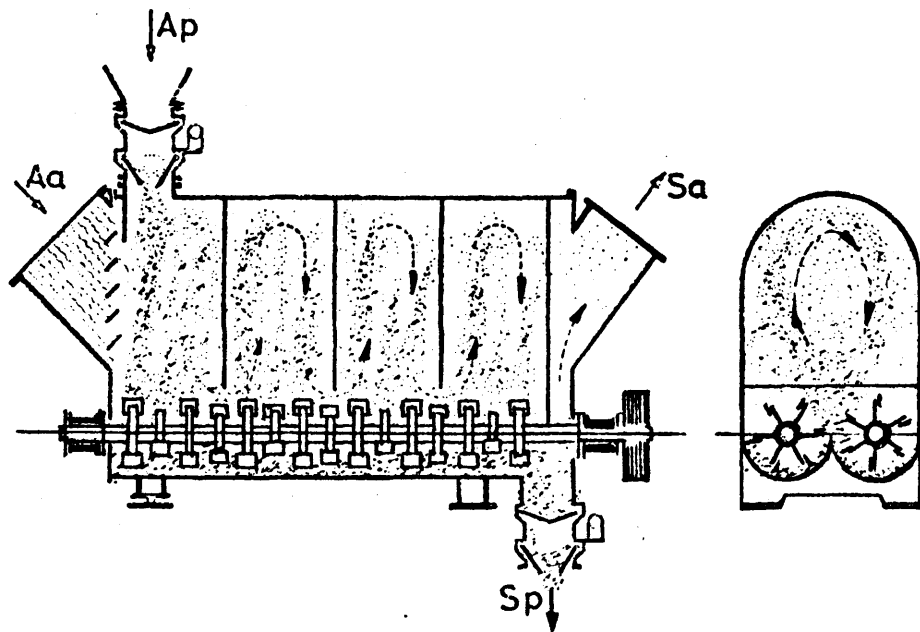


Fig. 10. Secadero de transporte neumático con turbulencia adicional provocada por medios mecánicos.

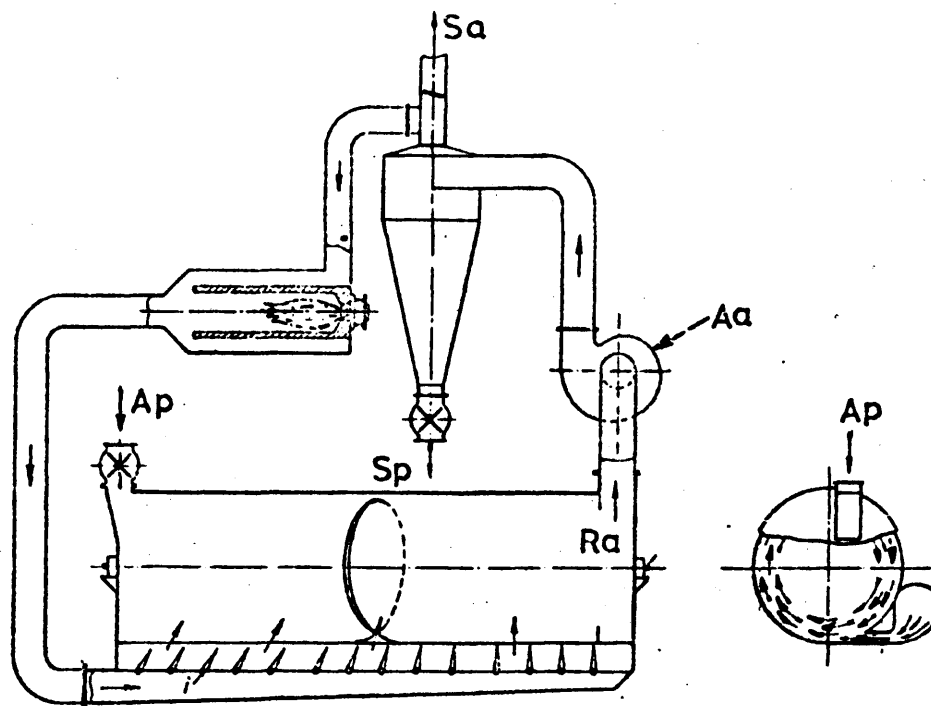


Fig. 11. Secadero de transporte neumático con turbulencia adicional provocada por la placa distribuidora de gas.

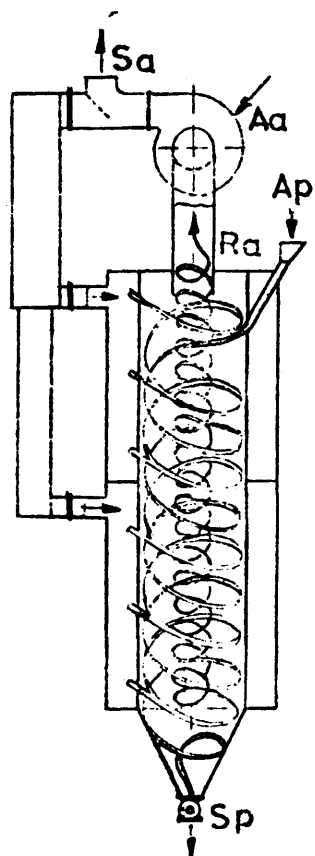


Fig. 12. Secadero vertical con turbulencia adicional provocada por la entrada del gas lateralmente.

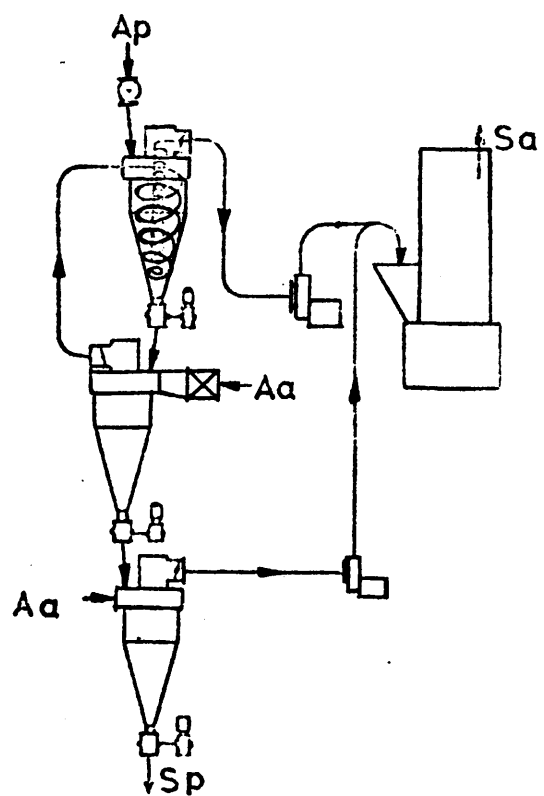


Fig. 13. Funcionamiento de ciclones como secadero.

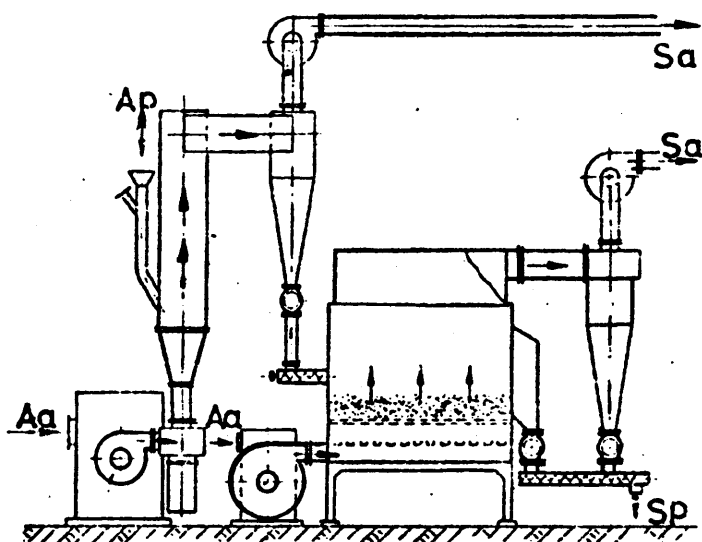


Fig. 14. Secaderos de transporte neumático y lecho fluidizado, acoplados en serie.

do, seguido de un lecho fluidizado para una segunda etapa, en la que se puede eliminar el agua que exija tiempos de residencia superiores a los que se pueden alcanzar en un tubo de transporte neumático.

En la bibliografía técnica no se encuentra ningún método que permita establecer con precisión el cálculo de estos equipos. Este hecho se debe, tal como se apuntaba anteriormente, al empirismo en que siempre se ha visto envuelto el proceso de secado, y a la dificultad de un tratamiento general del problema en situaciones tan variadas.

I.2. OBJETO DEL TRABAJO

Es opinión generalizada que en las circunstancias actuales, el diseño de un secadero exige en muchos casos una experimentación previa, y las razones que lleva anejas esta afirmación están basadas en:

- 1) Las características especiales de cada equipo de secado.
- 2) La determinación de una cinética o al menos de un tiempo de residencia, para el producto que se desea secar.

En muchos casos, el proyectista, basándose en la bibliografía, selecciona un procedimiento de secado y acudiendo a las casas constructoras de este tipo de secaderos ensaya su producto y conoce su comportamiento. En definitiva, su información está sujeta a terceros, con claros intereses, no sólo de orden técnico, sino también económicos.

Aportar una información que permita discernir sobre la posibilidad de utilizar secaderos de transporte neumático, es el objetivo que se ha propuesto en el presente trabajo.

Las razones de intentar utilizar un secadero de lecho fluidizado para definir las condiciones de operación en transporte neumático, se basan en las posibles analogías de las condiciones de turbulencia y en la facilidad de preparar el equipo de experimentación que sustituya a la gran dificultad que existe para disponer de un equipo de grandes dimensiones que permita simular las condiciones del transporte neumático.

Con este objetivo, se intenta correlacionar experimentos realizados en secaderos de lecho fluidizado de escala laboratorio, con los datos obtenidos en un secadero de transporte neumático de escala semi-industrial.

I.3. ASPECTOS TEORICOS

Con el fin de presentar una visión de conjunto de las operaciones de secado en transporte neumático y lecho fluidizado, se muestran a continuación diferentes aspectos que se consideran de interés.

En primer lugar, se presenta la forma en que está retenida el agua por los productos que se secan. Posteriormente, se pone de manifiesto que en secado en arrastre neumático principalmente se elimina agua superficial y en lecho fluidizado es posible eliminar, además de ésta, la situada en el interior del cuerpo.

En segundo lugar, se describen los mecanismos y periodos de secado, para justificar que en secado neumático la evaporación del agua transcurre probablemente en las condiciones no estacionarias iniciales.

En tercer lugar, al estudiar la transferencia de calor y materia y la forma de obtener datos cinéticos en experiencias isotermas, se indica la posibilidad de experimentar en

lecho fluidizado para discernir si un producto puede secarse en transporte neumático.

La determinación de los tiempos de residencia en un secadero de transporte neumático, se considera por separado para poner de manifiesto la dificultad de su obtención debido a la suma de los complejos fenómenos que se superponen.

Por último, se da un resumen de características y analogías de los secaderos de transporte neumático y lecho fluidizado.

I.3.1. Retención de agua por los productos

La evaporación del agua exige la aportación de una cierta cantidad de calor, y su cinética tiene que depender en alto grado de la manera en que el producto tiene retenida el agua.

Una sustancia puede retener agua de distintas maneras que, de una forma general, se clasifican en:

- 1°. Agua retenida en la superficie.
- 2°. Agua retenida en los intersticios o poros del producto.
- 3°. Agua retenida en el interior de una membrana.
- 4°. Agua retenida por uniones de tipo químico.
- 5°. Otras formas de retención en las que se incluyen simultáneamente dos o más de las anteriores.

En el caso primero de agua retenida sobre la superficie del producto a secar, los tiempos menores de duración del secado, para una misma posibilidad de aporte de calor, se obtendrán cuanto mayor sea la superficie de producto que se seca expuesta al agente de secado.

Cualquier sistema, mecánico o no, que provoque un desplazamiento del agua líquida desde la superficie del producto puede representar un gran beneficio en la operación.

La segunda posibilidad de retención de agua por el producto exige tiempos de residencia mayores. Cuando el agua está retenida superficialmente, los factores controlantes de la velocidad de secado, serán, al menos en principio, la superficie expuesta y la cantidad de calor transmitida para la evaporación del agua.

Cuando el agua se retiene intersticialmente pueden ocurrir dos casos en función del tamaño de los poros o intersticios. Si éstos son suficientemente grandes se presenta una variante del caso primero. Normalmente, se ha dado en llamar agua retenida en intersticios, cuando el tamaño de los poros o cavidades en los cuales está alojada el agua, es suficientemente pequeño como para que el proceso de secado no esté controlado por la magnitud del área del producto expuesta al agente de secado, ni por la cantidad de calor aportado, sino por la difusión del agua o del vapor desde el interior de los poros hasta el agente de secado.

Un análisis somero indica que la velocidad de secado, cuando controla el proceso de difusión en la interfase, será tanto mayor cuanto más elevada sea la turbulencia en las zonas próximas a la superficie de los poros, pues así se evitará la saturación del gas en la interfase sólido-gas. Pero esto sólo será cierto en el caso de que sea la difusión en la interfase el proceso controlante.

La variante más interesante y a la vez más difícil de estudiar, se presenta cuando la velocidad de secado está controlada por la difusión dentro del poro, que exige un tratamiento particular en cada caso, con una gran dificultad para interpretar el fenómeno con una función simple.

La ecuación de Sherwood que da la variación de la humedad en función del tiempo tiene muy poca aplicación, debido a la utilización de la difusividad, que está determinada para muy pocos materiales. Cuando se trata de secar productos con las características de humectación mencionadas, se habrá de prestar especial atención a la fase de obtención de la cinética de secado en el laboratorio.

El tercer punto, antes mencionado, se refiere al caso de que el agua se encuentre retenida en el producto, de tal forma que existe una membrana que impide su salida al exterior. Este tipo de productos es abundante y la mayoría de los productos vegetales se ajustan a estas características.

Las propiedades de la membrana externa juegan un papel decisivo en lo que a la eliminación de agua se refiere. Membranas muy porosas permitirán fácilmente la salida del agua, mientras que membranas casi impermeables controlarán definitivamente el proceso de secado. Si la difusión a través de la membrana que envuelve al producto, es la etapa controlante de la velocidad de secado, el proceso en principio será bastante lento.

En los casos antes estudiados se señalaba la influencia de la granulometría del producto desde el punto de vista del área expuesta al agente de secado, aquí de nuevo la granulometría es un factor importante. Sin embargo, se ha de prestar mayor atención a la evolución del área por unidad de volumen, que presentan las partículas a medida que se va efectuando el secado, que al tamaño inicial del producto. Es frecuente que se produzcan disminuciones de tamaño, debidas a la evaporación del agua, que en algunos casos llegan a alcanzar valores muy considerables, y además se pueden llegar a cerrar los poros.

Por otra parte, en el caso de productos naturales, debido a la posibilidad de degradación de proteínas, vitaminas y compuestos análogos, se ha de prestar especial aten-

ción a la temperatura a la cual se verifica el secado.

Cuando el agua que contiene la sustancia se encuentre retenida químicamente, no se estará totalmente ante una operación de secado, y la separación del agua no estará tan claramente definida como en el caso de la evaporación, ya que se han de vencer otras resistencias a la transferencia.

Normalmente las formas de retención mencionadas no se dan nunca de una manera aislada, sino que se presentan dos o más superpuestas.

I.3.2. Mecanismos y periodos de secado

En un diagrama de variación de la humedad con el tiempo, para una experiencia realizada isotérmicamente, se pueden apreciar, en general, tres periodos de secado claramente definidos. Normalmente se utilizan representaciones como las que pueden verse en las figuras 15 y 16.

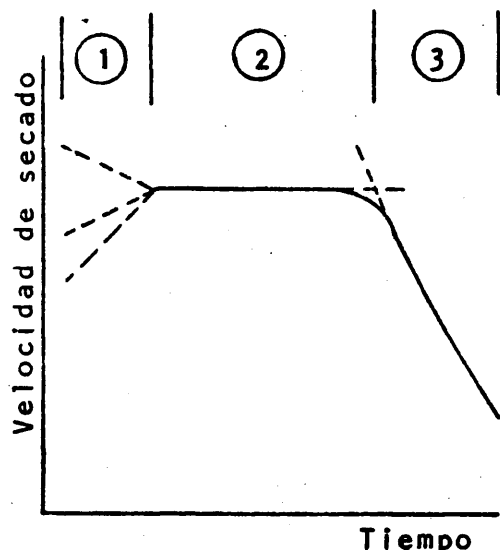


Fig. 15

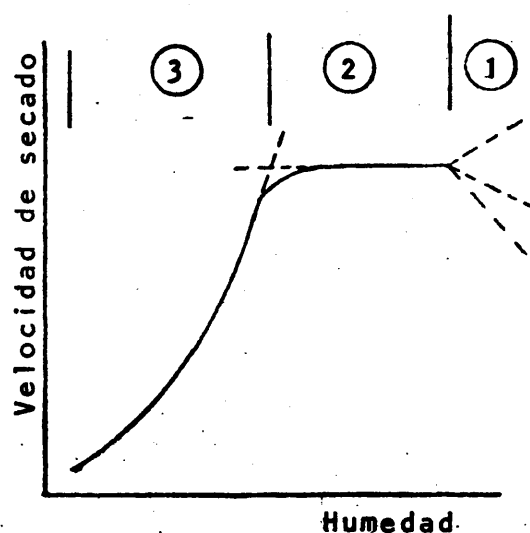


Fig. 16

Variación de la velocidad de secado con la humedad
y con el tiempo

La velocidad de secado $dH/d\theta$, presenta un primer periodo de régimen no estacionario, que puede tener distintas formas en función del producto a secar y dependiendo de la temperatura de entrada del producto y del procedimiento de secado elegido.

El tramo marcado en las figuras con el número 2 corresponde a un periodo en el que la velocidad de secado permanece constante. Durante este tiempo, se establece un equilibrio de transferencia de calor y materia, a temperatura constante.

Cuando la velocidad de secado disminuye, el proceso controlante es normalmente la velocidad de difusión del agua hasta la superficie del sólido. En estas condiciones, la velocidad con la que el agua emigra desde el interior del sólido hasta ponerse en contacto con el gas de secado, define la forma que puede tener este último tramo de las curvas de secado.

En la práctica, en secaderos con tiempos de residencia superiores a varios minutos, solamente los tramos 2 y 3 de velocidad constante y decreciente son los que tienen interés para un estudio cinético.

La humedad a la cual se produce la transformación de velocidad constante en decreciente se suele denominar humedad crítica. Se determina sobre el diagrama de velocidad por el punto de cruce de las líneas que representan ambas cinéticas.

Los mecanismos de secado, de acuerdo con lo expuesto en las figuras 15 y 16 en relación con la velocidad de secado, se presentan claramente en dos variantes, uno con velocidad constante y variable el otro. En este último caso, la variación de la velocidad se debe a:

- a) Un mecanismo complejo de transferencia de calor del fluido a la superficie y al interior del sólido,

con conductividad térmica diferente al ir variando su contenido de humedad y temperatura.

- b) La evaporación del agua, bien sea en su interior y difusión a través de los poros, o en su superficie si ésta está parcialmente humedecida.

En el primero, la velocidad de secado constante se debe a que al estar la superficie completamente cubierta de agua, se presenta la evaporación del agua sin ninguna influencia del sólido, sólo su posible acción sobre la tensión de vapor del agua, si es soluble en ella y, por lo tanto, su acción será constante ya que el agua estará saturada. Existe una temperatura de equilibrio para el sólido, para la cual, el salto de temperatura aire-superficie del sólido, hace que en la transferencia del calor, se aporte el necesario para que se evapore el agua de acuerdo con la fijada por la diferencia de la presión de vapor del agua a dicha temperatura menos la presión parcial del agua en el aire.

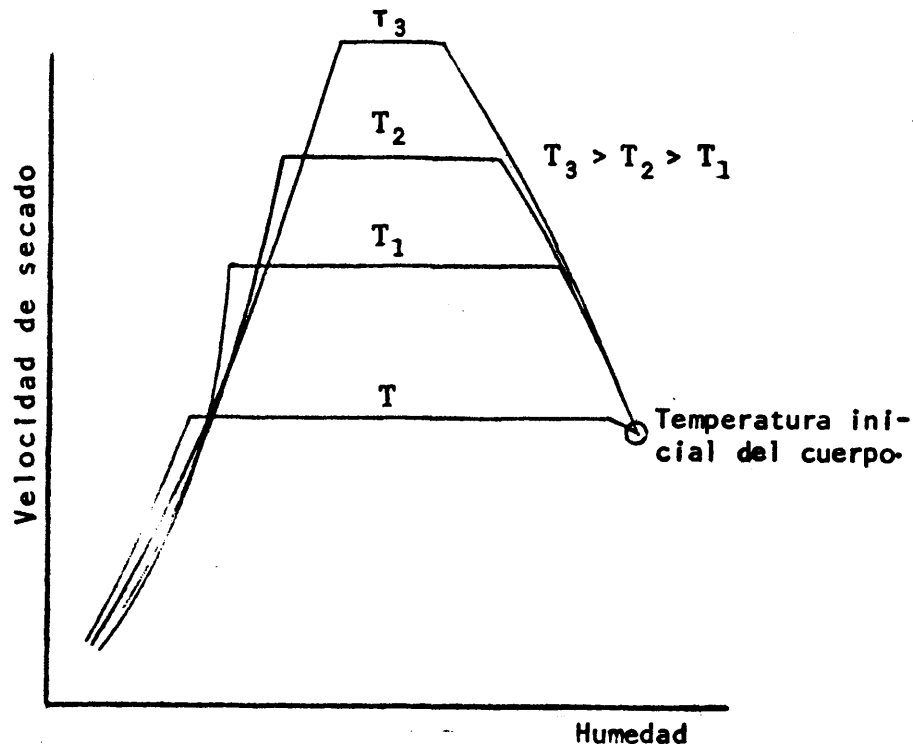


Fig. 17

Variación de la velocidad de secado con la temperatura

El primer tramo de velocidad variable se presenta como la zona en la que no se ha alcanzado la temperatura de equilibrio anterior. Esta zona es la que representa el mecanismo de secado en las condiciones de operación del secadero de transporte neumático.

En la figura 17 se ha repetido la figura 16, representando varias experiencias isotermas realizadas con el mismo producto. El tramo de velocidad constante, correspondiente a superficie recubierta de agua, se hace más corto a medida que la temperatura crece y el tramo inicial puede hacerse más amplio, esto es, las condiciones estacionarias exigen lógicamente más tiempo para alcanzarse.

Si en secado en transporte neumático se establece la hipótesis de que dado el tiempo de residencia usualmente exigido, fracción de segundo o varios segundos, el agua evaporada sólo es superficial, es lógico pensar que la experiencia isoterma que representa el secado se podrá representar como se indica en la figura 18 y la velocidad de secado corresponderá totalmente al régimen transitorio inicial.

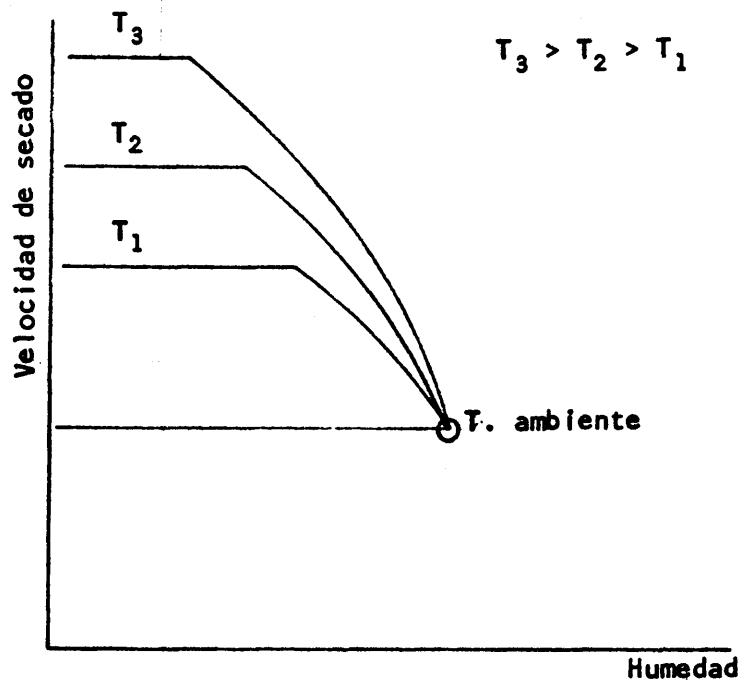


Fig. 18

Variación de las velocidades iniciales de secado a diferentes temperaturas

I.3.3. Transferencia de calor y materia en la operación de secado en transporte neumático y en lecho fluidizado

La cinética de la transferencia de calor y materia, consideradas por separado o simultáneamente, definen los tiempos de secado necesarios para una determinada variación del contenido de humedad del cuerpo que se desea secar y, por lo tanto, en forma indirecta el tamaño del secadero.

El análisis de ambas transferencias en el caso del secado en transporte neumático adiabático, se puede plantear en la forma siguiente:

Transferencia de calor.

Balance térmico:

$$(m_{He} - m_{Hs})\lambda + m_s c_s (T_e - T_s) = m_a c_a (T'_e - T'_s)$$

Se ha igualado la cantidad de calor cedida por el aire al calor requerido por el agua para evaporarse, más la cantidad de calor que ha sido utilizada para elevar la temperatura del sólido húmedo que se seca.

Velocidad de transferencia de calor:

$$\frac{dQ}{d\theta} = US (T - T')$$

Transferencia de materia.

Balance de materia:

$$m_s (H_e - H_s) = m_a (Y_s - Y_e)$$

En la que se iguala la cantidad de agua evaporada al agua aceptada por el aire.

Velocidad de transferencia de materia:

$$\frac{dN}{d\theta} = KS (p_s - p_v)$$

Siendo:

- θ ... Tiempo (s).
- T ... Temperatura ($^{\circ}\text{C}$).
- m_a ... Masa de aire (Kg).
- m_s ... Masa de sólido seco (Kg).
- m_H ... Masa de agua correspondiente a la humedad H (Kg).
- c_s ... Calor específico del sólido (Kcal/Kg \times $^{\circ}\text{C}$).
- c_a ... Calor específico del aire (Kcal/Kg \times $^{\circ}\text{C}$).
- λ ... Calor de vaporización del agua (Kcal/kg).
- H ... Humedad (kg agua/Kg cuerpo seco).
- Y ... Humedad del aire (Kg agua/Kg aire seco).
- p_s ... Presión de vapor del agua (mm Hg).
- p_v ... Presión parcial del agua en el aire (mm Hg).

La integración de las expresiones anteriores exige conocer los coeficientes de transferencia U y K para el tamaño de las partículas del sólido que se seca y la variación de $T - T'$ o $p_s - p_v$ en función de Q o de N . Es obvia la dificultad experimental de conocer ambas funciones en forma rigurosa y por ello se han propuesto simplificaciones.

Así, para la diferencia $T - T'$, se asigna a T' el valor 100°C , suponiendo que cuando el aire supera esta temperatura, el agua superficial del sólido adquiere la temperatura de ebullición instantáneamente. En forma análoga p_s corresponderá, en la misma suposición, a la presión de vapor de agua en ebullición, esto es, 760 mm Hg y en general será muy grande comparado con el valor p_v en el aire, y ésta se-

r  en general despreciable frente a la primera. Esta suposi-
ción no ha sido confirmada por medios experimentales y es
bastante difícil admitir que se alcance en el tiempo de re-
sidencia que usualmente se tiene en un secadero neumático,
fracción de segundo o varios segundos. Existe, por tanto,
un inconveniente difícilmente salvable para poder utilizar
las expresiones anteriores.

Un camino más simple podrá seguirse si en la experi-
mentación en el tubo de arrastre neumático se operase en fa-
se diluida, en cuanto a concentración de sólidos. Así, la
variación de temperatura del aire, en el tubo de transporte
neumático, podrá considerarse infinitamente pequeña, para
admitir como representativa del fenómeno la temperatura me-
dia entre entrada y salida. A esta temperatura se puede de-
terminar experimentalmente la variación de humedad en el
cuerpo que se seca y su tiempo de residencia medio, con lo
que es inmediato el cálculo de la velocidad media de secado,
expresada como cantidad de agua evaporada referida a canti-
dad de cuerpo seco y tiempo.

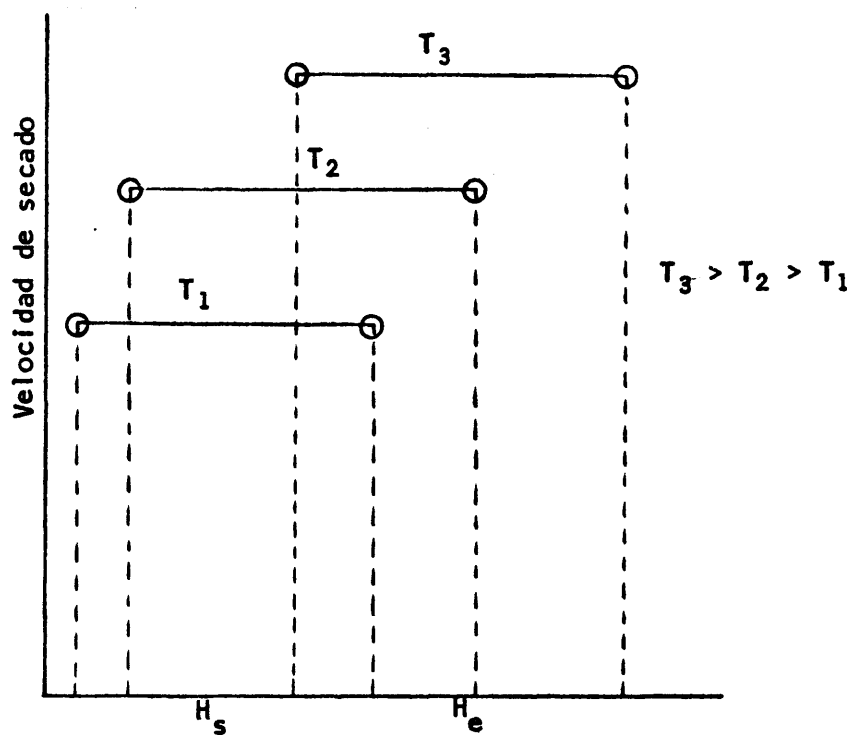


Fig. 19

Variación de la velocidad de secado con la temperatura,
para el caso de secaderos de transporte neumático

La representación de la velocidad de secado, $\mu = dH/d\theta$, en función del contenido de humedad y de la temperatura se indica en la figura 19.

Con los valores medios de μ , se puede definir una función $\mu = f(H)$ para la operación en un secadero de transporte neumático no isotermo, esto es, que no opere en fase sólida diluida, sino en la proporción requerida para que el aire experimente una variación de temperatura acorde con el rendimiento térmico que se desea obtener. Para ello se recurre a la solución gráfica que se indica en la figura 20.

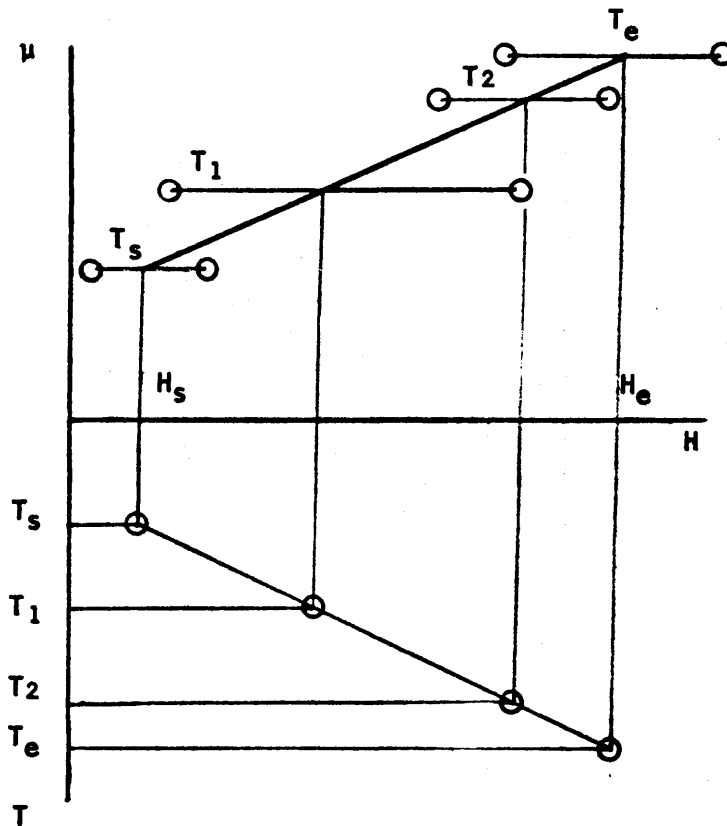


Fig. 20

Variación de la velocidad de secado en un secadero de transporte neumático con salto de temperatura

El tiempo se calcula mediante la expresión:

$$\theta = \int_{H_e}^{H_s} \frac{dH}{u}$$

La solución gráfica es fácil de comprender al observar la figura 21.

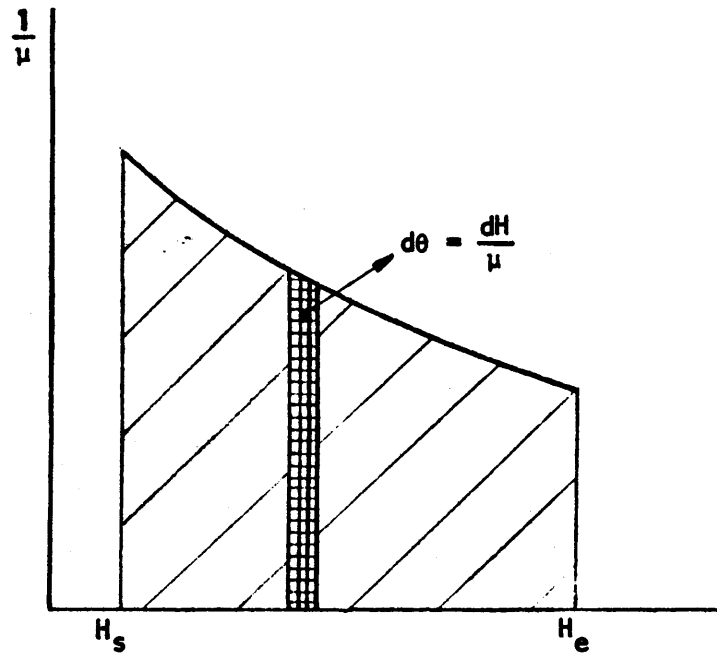


Fig. 21

Solución gráfica para la determinación del tiempo de residencia en el caso de un secadero de transporte neumático con salto de temperatura.

Esta solución es una aproximación, pues en ella se admite que la velocidad es sólo función de la temperatura del aire y la importancia de la humedad no se deja clara.

Por otra parte, al operarse en la realidad en forma no isoterma, el método expuesto admite que la cinética no está influida por las condiciones en que se ha secado la partícula antes de que el aire alcance una determinada temperatura. No obstante, se considera que este tratamiento del problema conducirá a resultados conservativos ya que las velocidades determinadas experimentalmente se han obtenido a partir de partículas del material a la temperatura ambiente, y en ellas la presión de vapor del agua es más pequeña que en el caso del secadero real, en donde a partir de la alimentación las partículas van pasando a secciones con temperatura diferente superior a la temperatura ambiente y, por lo tanto, la velocidad de secado que les corresponde en estas circunstancias es mayor que la del ensayo isoterma, tal como se indicó al exponer la cinética de secado en el periodo transitorio inicial.

En el caso del secado en lecho fluidizado, se puede tratar la cinética de forma análoga a la que se ha presentado para el secado en transporte neumático. La posibilidad de obtener datos cinéticos en condiciones isotermas se resuelve experimentalmente cargando el secadero con producto seco al que se añade una pequeña cantidad de producto húmedo. Dada la buena agitación del lecho fluidizado, las muestras que se obtienen son mezcla homogénea de las partículas secas y húmedas y por lo tanto la variación de humedad permite el cálculo de la velocidad de secado, conocidos los intervalos de toma de muestra.

En estas condiciones, debido a que la evaporación de agua es pequeña en relación con el caudal de aire, la diferencia entre las temperaturas de entrada y salida del aire en el lecho fluidizado es pequeña y, por lo tanto, la experiencia puede considerarse prácticamente isoterma. A medida que progresa el secado, y la humedad superficial de las partículas es nula, la velocidad de secado decrece y en estas condiciones ya no sería necesario operar diluyendo la alimentación de cuerpo húmedo, pues al ser menor la evapora-

ción, se cumple la condición requerida para que el ensayo se considere isoterma.

Al comparar en forma cualitativa las cinéticas de secado de diferentes cuerpos húmedos en lecho fluidizado y en transporte neumático mediante las funciones de pérdida de agua con el tiempo, se tiene la gráfica representada en la figura 22.

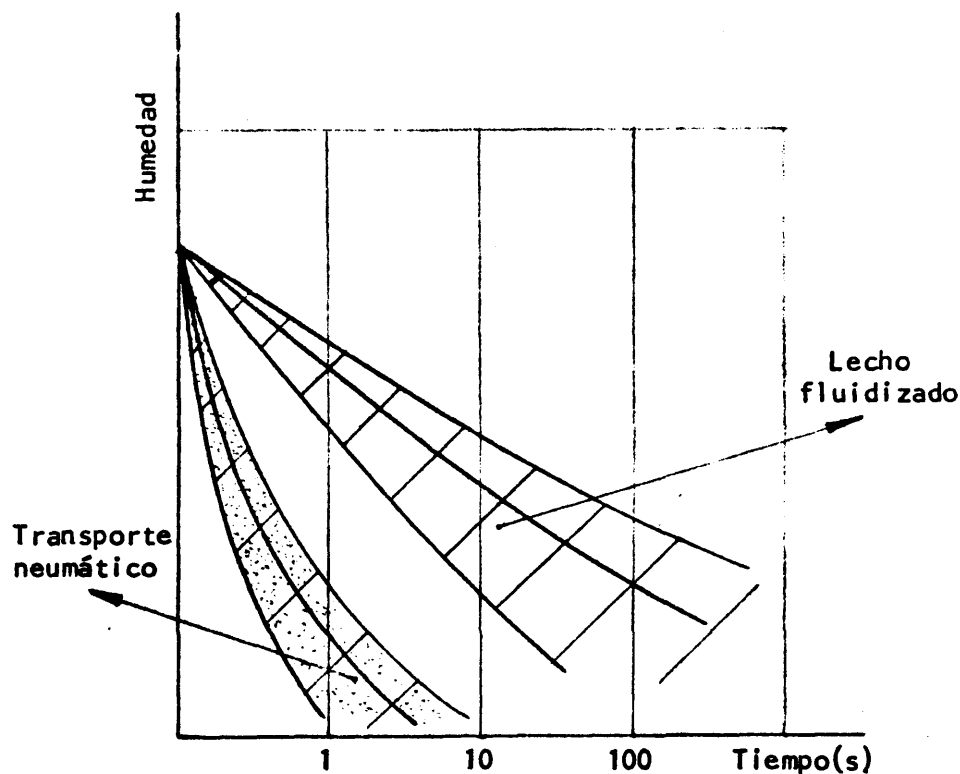


Fig. 22

Comparación entre velocidades de secado en lecho fluidizado y en transporte neumático

En ella se indica que los cuerpos que pueden ser secados en transporte neumático presentan tiempos de secado del orden de la fracción de segundos o varios segundos, y en el caso de los que pueden secarse en lecho fluidizado se supe-

ra en general el minuto y se tienen valores práctidos de operación en continuo, debido al flujo de mezcla del sólido, de una o varias decenas de minutos.

De acuerdo con esta exposición cualitativa, si se intentase obtener en una experiencia isoterma en lecho fluidizado, la cinética de secado de un producto para el que fuese indicado emplear un secadero de transporte neumático, no sería posible conseguir la cuasi isothermicidad de la experiencia, pues la velocidad de secado es mucho mayor que la correspondiente a una operación en lecho fluidizado, y en consecuencia aparecerá una variación entre las temperaturas de entrada y salida del aire en el secadero.

En forma cualitativa esta experiencia, caso de que no sea isoterma, podrá indicar, sólo con la medida de las temperaturas de entrada y salida del aire, que el producto con el que se está experimentando probablemente se podrá secar en un secadero de transporte neumático. Es inmediato comprender que en este caso difícilmente se podrá tomar muestras para determinar la variación de humedad con el tiempo.

Una posibilidad de estimar la evaporación de agua se presenta al establecer un balance térmico que considere: el caudal de aire con sus temperaturas de entrada y salida en el secadero, el tiempo en el que se produce la variación de temperatura, la alimentación de cuerpo húmedo y la carga de cuerpo seco en el lecho fluidizado. En esta idea se han planteado en el presente trabajo diferentes variantes de balance con las que se trató de estimar las velocidades de evaporación y por tanto las de secado, operando con un producto para el que está indicado el secado en transporte neumático.

I.3.4. Tiempos de residencia en secaderos de transporte neumático

El movimiento de las partículas de sólidos en un secadero de transporte neumático es complejo y actualmente no se dispone de información experimental suficiente para predecirlo.

La velocidad de las partículas, en principio, tendrá que fijarse calculando la de sedimentación en el medio en que se transportan y restándola de la que tiene el medio de transporte. Es usual utilizar la expresión "velocidad de deslizamiento" para dar la velocidad real de las partículas que resulta ser inferior a la calculada en la forma anterior.

La forma no esférica de las partículas, su densidad real y aparente, su posible rotación durante el desplazamiento producida con frecuencia en circunstancias no claras y el establecimiento de una velocidad mínima de arrastre, justifican la dificultad para tener un tratamiento riguroso del problema, al mismo tiempo que plantean la necesidad de aportar información al problema con el fin de poder vislumbrar algo sobre su complejo mecanismo.

En la bibliografía la información limitada abarca los aspectos siguientes:

- a) Relación entre las alteraciones de flujo y el número de Reynolds de las partículas (Chang, 1970).
- b) Turbulencias en el caso de partículas no esféricas (Torbin y Gauvin, 1960).
- c) Distribución de la concentración de las partículas en el tubo de transporte (Soo y col., 1964).
- d) Determinación de la velocidad real de partículas y la distribución en el tubo de transporte (Reddy y col., 1969).

- e) Métodos para la determinación de las aceleraciones de las partículas (Mc Carthy y Olson, 1968).

A pesar de ello la naturaleza de las interacciones entre las variables que afectan, no es bien conocida y en general para cada caso se requiere una determinación experimental de tiempos de residencia.

Como la distribución de tiempos de residencia puede dar velocidades con unos valores límites separados en el orden del valor de la velocidad media (Debrand, 1974), resulta extraordinariamente complejo establecer valores de tiempos de residencia de una forma no experimental.

I.4. SECADEROS DE TRANSPORTE NEUMATICO Y LECHO FLUIDIZADO. ANALOGIAS Y DIFERENCIAS

I.4.1. Secaderos de transporte neumático

En los secaderos de transporte neumático propiamente dichos, una característica del producto que tiene una gran influencia a la hora del diseño de un equipo de este tipo, es su granulometría. En primer lugar, porque puede definir si el producto es apto o no, para ser secado en arrastre neumático, pues un tamaño de grano excesivamente grande determinaría unas velocidades de arrastre tan elevadas que no podrían utilizarse. Por otra parte, teniendo en cuenta que los tiempos de residencia son normalmente muy cortos, el tamaño del producto afecta las interacciones que puedan ocurrir en el interior del tubo de transporte.

En lo que se refiere a la forma de alimentación, el dispositivo mecánico es el usual para alimentación de sólidos. Con frecuencia se utiliza un sistema de desintegración mecánica que cumple la doble misión de conseguir un tamaño adecuado de partículas y la de introducir la alimentación en el sistema de secado.

El caudal de gas, además de poder condicionar la temperatura de salida, afectará notablemente el tiempo de resi-dencia, pues dentro de ciertos límites, determina la veloci-dad de arrastre del producto en el secadero.

El factor turbulencia establecido por el tipo de flujo en el tubo de secado y la posibilidad de turbulencia adicio-nal provocada por el diseño de las paredes, favorecerán to-dos los procesos de transferencia de calor y materia, pues-to que permitirá una mayor facilidad de desplazamiento de la interfase gas-sólido, que podría quedar saturada de agua.

Desde el punto de vista de flujo, dentro del tubo ver-tical, se tiene un sistema de circulación en corrientes pa-ralelas, con flujo de pistón, tanto para el gas de secado como para las partículas que se secan. En el ciclón puede considerarse que el flujo es de pistón desde el punto de vista de las partículas y la temperatura que puede tomarse para el gas de secado es la correspondiente a la salida del ciclón.

I.4.2. Ventajas e inconvenientes de los secaderos de arras-tre neumático

Como cualidades más satisfactorias se tienen:

- 1°. El corto tiempo de residencia permite el tratamien-to de materiales termosensibles, y la utilización de altas temperaturas de entrada para el gas.
- 2°. Evita la utilización de otro medio de transporte.
- 3°. Se requiere poco espacio para su instalación y los costos de mantenimiento son muy bajos.
- 4°. La inversión es muy baja comparada con otros tipos de secaderos.

Entre las desventajas cabe destacar:

- 1°. Se requiere un buen sistema de recogida de polvos en la salida. Este hecho puede invalidar este tipo de secaderos para algunos productos, p. ej. tóxicos.
- 2°. Si la alimentación no es homogénea pueden presentarse problemas, tanto para el transporte como para el sistema de alimentación.

I.4.3. Secaderos de lecho fluidizado

En los secaderos de lecho fluidizado se tiene siempre un flujo de mezcla total para el sólido y casi siempre se estima lo mismo para el gas dentro del lecho.

La granulometría afecta la velocidad mínima de fluidización, que puede estar influida por el espectro de diámetro de partículas.

El funcionamiento en continuo de este tipo de secaderos no ofrece dificultades, sin embargo, es de desear un buen ajuste en la granulometría con objeto de evitar un elevado desprendimiento de finos.

Es de señalar también, que es mucho más abundante la bibliografía existente en torno al lecho fluidizado que la que se conoce para arrastre neumático, la razón fundamental estriba en que la investigación a escala de laboratorio para lecho fluidizado no ofrece grandes dificultades.

I.4.4. Ventajas e inconvenientes de los secaderos de lecho fluidizado

Entre las ventajas destacan:

- 1°. El espectro de partículas que se pueden secar es mucho más grande que en el caso del transporte neumático.
- 2°. El contacto entre el sólido y el gas de secado es más íntimo que el que se puede obtener con cualquier otro tipo de secadero.
- 3°. Los tiempos de residencia que se pueden tener son tan amplios como se desee.
- 4°. Los costos por superficie, instalación y mantenimiento son bajos comparados con otros equipos de capacidad similar.

Los inconvenientes más destacables son:

- 1°. El material que se va a secar debe permitir su fluidización.
- 2°. Debe preverse un sistema para recogida de polvos cuando los tamaños de partícula son pequeños.

I.4.5. Analogías y diferencia entre secaderos por arrastre neumático y lecho fluidizado

- a) En los dos sistemas se tiene una turbulencia muy elevada con lo cual se ven favorecidos los procesos de transferencia de calor y materia.
- b) La granulometría de los productos utilizados en los dos sistemas es muy similar, lo que permite el uso combinado de ambos en un mismo proceso de secado.
- c) Los tiempos de residencia en el secadero por arrastre neumático son extraordinariamente cortos, mientras que en el lecho fluidizado se pueden tener en comparación, tiempos relativamente grandes.

- d) Los secaderos de arrastre neumático trabajan normalmente con un salto de temperatura más o menos grande, sin embargo, los secaderos de lecho fluidizado, permiten un control más ajustado de la temperatura del sólido.

- e) En el secadero de arrastre neumático, con su corto tiempo de residencia, la temperatura de entrada del gas puede ser bastante alta con lo que se tendrán velocidades grandes de secado, (sin peligro para la sustancia que se seca, incluso en el caso de productos termodegradables). En el secadero el lecho fluidizado por tener flujo de mezcla total para el gas dentro del lecho, la temperatura permanecerá prácticamente constante, cuando se alcancen condiciones de régimen estacionario.

II. INSTALACIONES Y TECNICAS EXPERIMENTALES

II.1. INSTALACIONES EXPERIMENTALES

Se han diseñado y montado para realizar la experimentación dos variantes de secaderos de transporte neumático y un secadero de lecho fluidizado. A continuación se describen poniendo de manifiesto sus características fundamentales.

II.1.1. Descripción del equipo experimental de secado en transporte neumático

Las partes fundamentales que se detallan son las siguientes:

- Sistemas de alimentación.
- Columnas de secado.
- Calefacción y aislamiento.
- Sistema de recogida de productos.
- Regulación de temperaturas, control y registro.
- Determinación de tiempos de residencia.

II.1.1.1. *Sistema de alimentación*

Las columnas de secado se han de alimentar con el agente de secado y el producto a secar, por lo que se trata se-

paradamente el equipo concerniente a cada una de las alimen
taciones.

II.1.1.1.1. Alimentación del aire

El aire llega al secadero por una conducción de acero estirado, procedente de una bomba de anillo hidráulico (Fig. 23), movida por un motor de 23 CV, y capaz de soplar 500 m³ de aire/hora.

La curva característica de este tipo de bombas presenta una elevada pendiente, esto indica que variaciones en la pérdida de carga a lo largo de la conducción no afectan prácticamente al caudal, por lo tanto, la regulación del caudal de aire se ha hecho actuando sobre válvulas que permiten la salida del aire fuera de la conducción y así, instalando válvulas de distintos tamaños se puede llegar a tener una buena regulación del caudal.

La medida del caudal de aire se hace por medio de una placa de orificio instalada en la conducción y lectura en un manómetro diferencial con agua.

II.1.1.1.2. Alimentación del producto a secar

Consiste en un tubo de vidrio de 940 mm de longitud y 24 mm de diámetro, que lleva soldada en la parte inferior una placa porosa para soportar el producto a secar; este producto se introduce en la columna de secado por medio de una inyección instantánea de aire a la temperatura ambiente. El tubo va colocado en la parte inferior de la columna y pa
sa por el interior del haz de tubos que constituyen el ende
rezador de corriente (Figuras 24, 25 y 26).

Este sistema de alimentación, permite colocar el pro
ducto a secar en la corriente del gas caliente en una direc
cion.

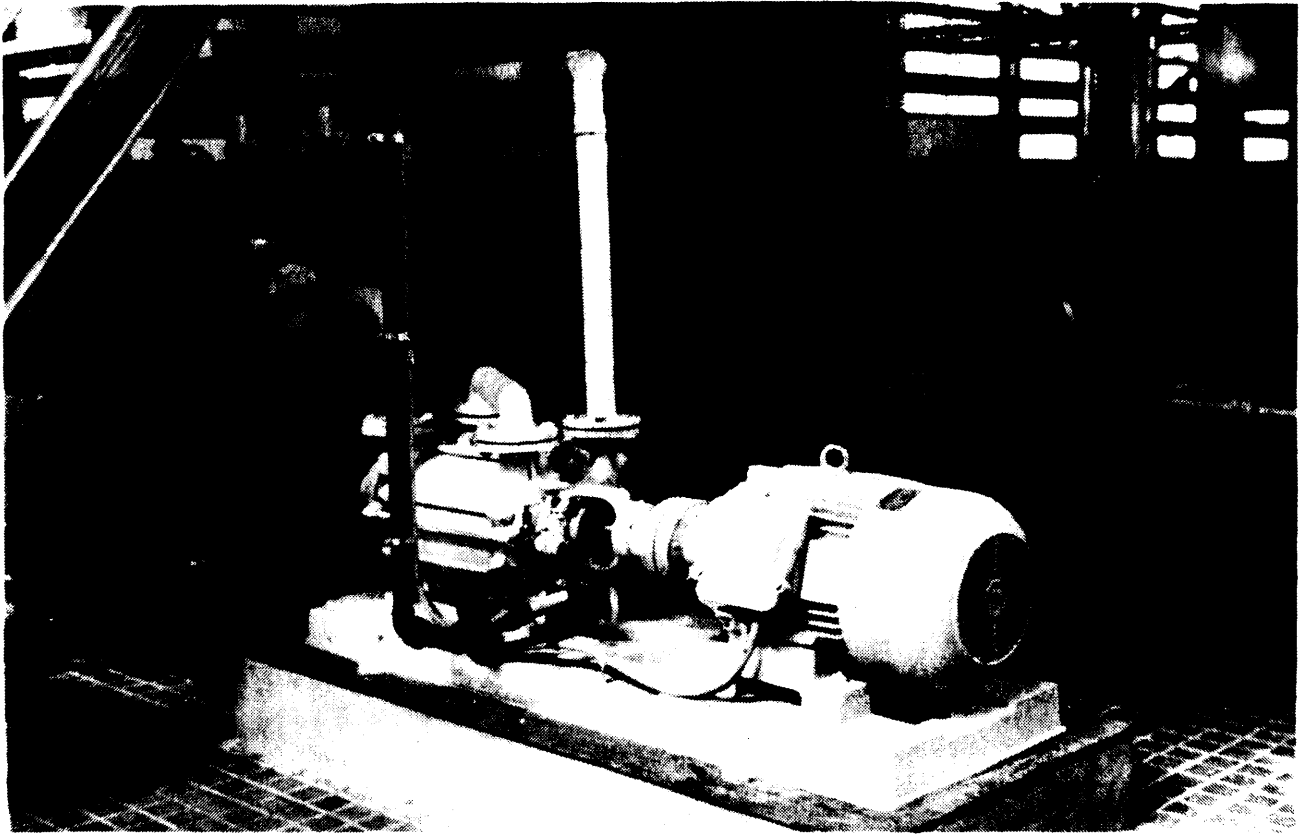


FIGURA 23

Vista de la soplante de aire acoplada al depósito separador de agua

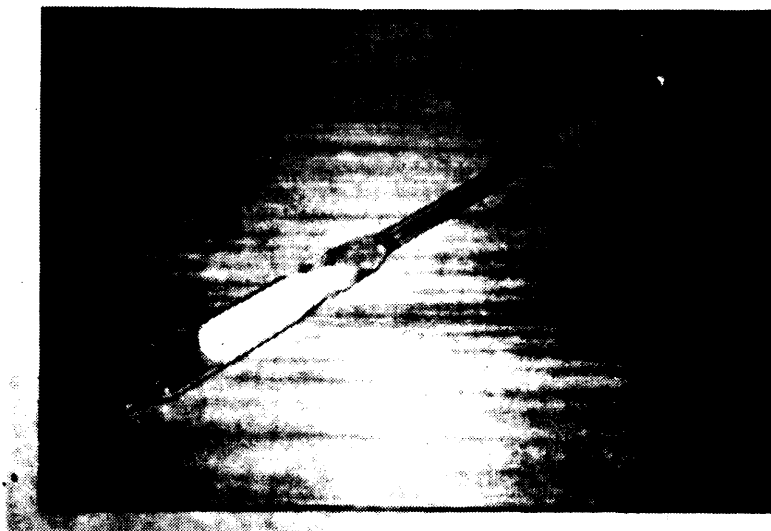


FIGURA 24

Dispositivo para la alimentación del producto húmedo

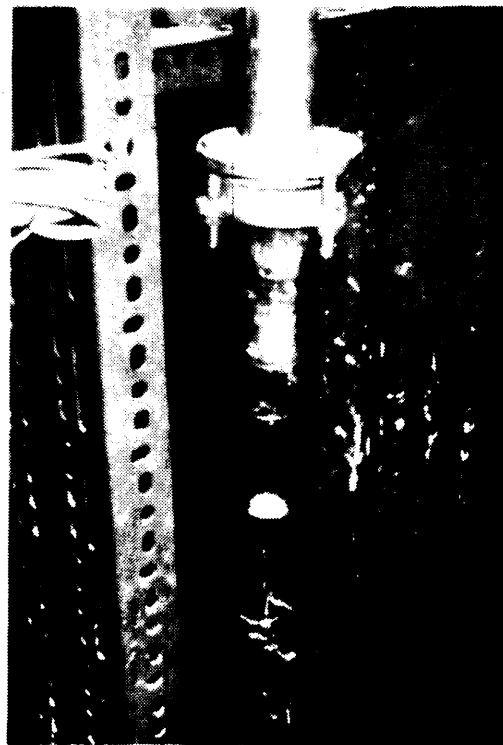


FIGURA 25

Detalle del sistema de alimentación
de producto húmedo



FIGURA 26

Enderezador de corriente.



FIGURA 27

Parte inferior de la columna de secado, mostrando
el sistema de calefacción

ción paralela al flujo del mismo y con una velocidad aproximadamente igual a la del aire. Con esto, se consigue evitar la turbulencia de entrada y así disminuir grandemente sus posibles efectos perturbadores.

II.1.1.2. Columnas de secado

II.1.1.2.1. Columna de 100 mm de diámetro

Está formada por una sucesión de tubos cilíndricos y tiene una longitud total de 11,5 m y un diámetro interior de 100 mm.

Por la función que desempeña cada uno de los tramos, la columna puede dividirse en tres partes fundamentales:

a) Parte inferior.

Constituida por dos tubos de vidrio Q.V.F. de 1,5 m de longitud cada uno.

Un enderezador de corriente se encuentra colocado en el interior del primer tubo y soportado, en su parte inferior, sobre el codo que une el tubo de secado propiamente dicho con el tren de calefacción. Consta de un haz de diecisiete tubos de 300 mm de longitud. Por el interior del tubo central penetra el tubo de vidrio para la alimentación del producto a la columna de secado. La misión del enderezador es conseguir que el aire a la salida del mismo presente un perfil de velocidad prácticamente plano, con lo cual se pretenden evitar de nuevo las posibles distorsiones que se pueden ocasionar por la curvatura situada a la entrada de la columna de transporte neumático.

La misión específica de este primer tramo de tubo de vidrio es permitir ver los efectos relacionados con la alimentación del producto a secar (Fig. 27).

b) Parte media de la columna.

Está formada por dos tubos metálicos de 1,5 m de longitud cada uno. Estos tubos para su unión con el resto de la columna llevan bridas de hierro de 10 mm de espesor, 210 mm de diámetro externo, 96 mm de diámetro interno y 6 agujeros de 10 mm de diámetro, (las medidas de las bridas de hierro venían fijadas por las características de las que se usan para el vidrio).

En la parte exterior de estos tubos van enrolladas unas resistencias que se aíslan con polvo de amianto adosado como cemento. En los extremos de los tubos existen unas tubuladuras pequeñas, que permiten introducir un termómetro de resistencia en cada una de ellas, para medir la temperatura.

La misión específica de este tramo intermedio es recalentar el aire, compensando las caídas de temperatura y permitiendo trabajar en unas condiciones "cuasi-isotermas", (Fig. 28).

c) Parte superior de la columna.

Consta de tres tubos de vidrio también de 1,5 m de longitud y 100 mm de diámetro interno cada uno. En la parte alta de este tramo está instalado el sistema de toma de muestras y detrás de él existe un codo que une el tubo de transporte al ciclón separador, (Fig. 29).

La misión de este último tramo de la columna es permitir ver los efectos concernientes al arrastre en el último intervalo, así como las distorsiones fluidodinámicas provocadas por el sistema de recogida de muestras.



FIGURA 28

Parte media de la columna de secado, mostrando los
tramos aislados de la calefacción secundaria



FIGURA 29

Vista de la parte superior de la columna de secado
con el ciclón separador

II.1.1.2.2. Columna de 36 mm de diámetro

Esta segunda columna es esencialmente igual que la anterior con la única diferencia del diámetro que es más pequeño, (Fig. 30).

Está construida de acero galvanizado en su totalidad. Solamente en unos pequeños tramos de 20 cm de longitud, a la entrada y a la salida, se colocaron tubos de vidrio para poder medir los tiempos de residencia, (Fig. 31).

La razón por la cual se construyó esta nueva columna fue la necesidad de experimentar con temperaturas hasta 250°C, que no era posible alcanzar en la columna con tramos de vidrio, por exigir una potencia de calefacción superior a la que se disponía en la Planta Piloto. Estaba totalmente aislada para poder mantener las condiciones "cuasi-isotermas".

Todos los demás elementos, tales como sistemas de medida, calefacción, soplane, etc., son comunes en ambas columnas por razones obvias de economía.

II.1.1.3. Calefacción y aislamiento

Para la calefacción del aire se manejan industrialmente distintos procedimientos, dos de los más frecuentemente usados son:

- a) Calefacción del aire que circula por el interior de tubos, calentados éstos exteriormente por llama de combustible líquido o gas.
- b) Otro sistema frecuentemente utilizado es la calefacción directa con llama, mezclándose el aire con los gases de combustión.



FIGURA 30

Vista de la parte inferior de las dos columnas de secado utilizadas para la experimentación en transporte neumático.

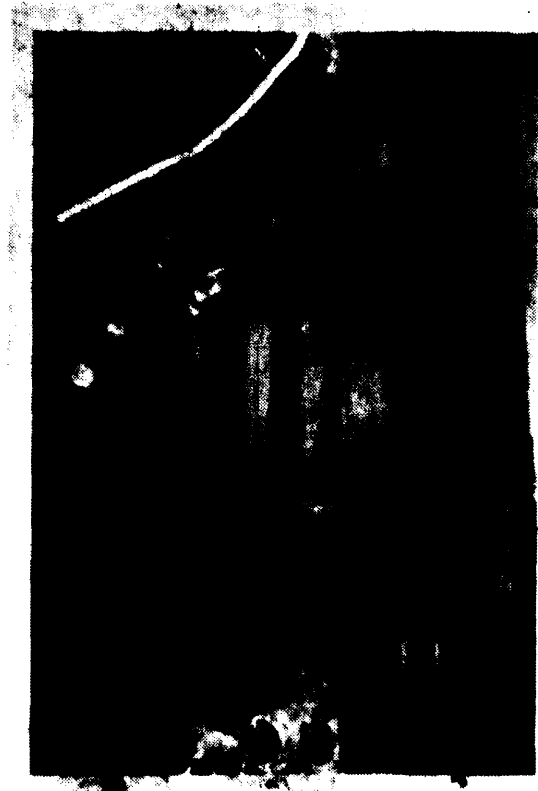


FIGURA 31

Detalle de la colocación de un elemento sensible para la detección de tiempos de residencia.

133

Sin embargo, la experimentación detallada exige la posibilidad de mantener un elevado control sobre la temperatura. Por ello se ha elegido un sistema de calefacción eléctrica, que permite una mayor versatilidad y un mejor control de la temperatura, y además es de bajo coste de instalación y fácil montaje.

En el equipo instalado se pueden diferenciar dos partes fundamentales:

- a) Sistema principal o tren de calefacción.
- b) Sistema de calefacción auxiliar

En ambos casos se utiliza hilo de resistencia de 4,5 ohmios/metro.

a) Calefacción principal.

Está instalada sobre un tubo de acero de 1,5 m de longitud y 100 mm de diámetro interno, soportada sobre una estructura metálica. Las resistencias tienen cada una conexión individual, y van enrolladas sobre 12 piezas de material refractario ondulado de 90 mm de longitud y 40 mm de diámetro, (Fig. 32). La potencia total instalada es de 12 Kw.

Las piezas refractarias están colocadas radialmente en la conducción de aire, soportadas por varillas que van soldadas en su parte posterior a una brida ciega. Las conexiones de cada elemento de calefacción se realizan exteriormente, permitiéndose la salida de los hilos entre dos juntas de calorit que a su vez sirven de cierre hermético para las bridas.

La regulación de temperatura puede hacerse por conexión o desconexión de una o más resistencias y en una de ellas puede regularse con un autotransformador la tensión de alimentación en forma continua.

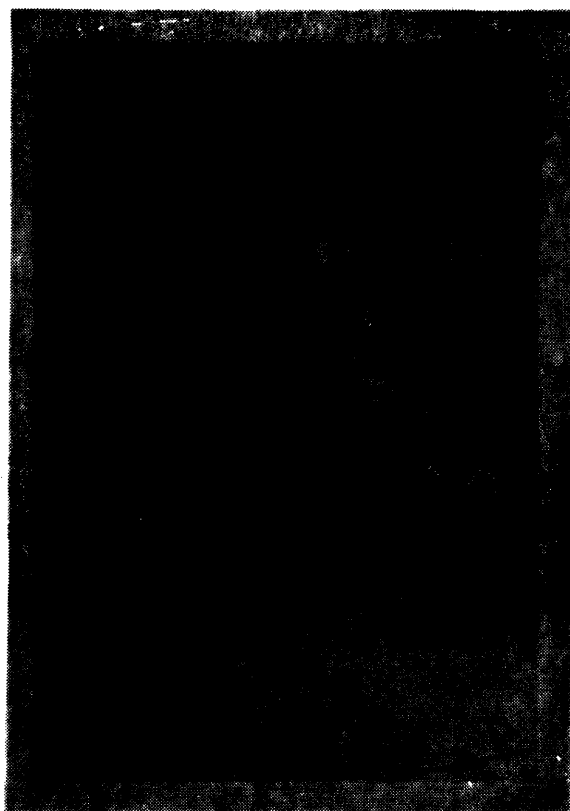


FIGURA 32

Detalle de un elemento de calefacción

b) Calefacción auxiliar.

Consta de una serie de resistencias que van enrolladas en los tubos metálicos de la columna de secado; la potencia suministrable es de 2 Kw. La tensión de alimentación en estas dos resistencias se puede variar con dos autotransformadores, lo que permite una mejor regulación de la temperatura. La resistencia va perfectamente aislada por un lado con cartón de amianto y por otro con polvo de amianto cementado.

La finalidad de esta calefacción auxiliar es evitar el enfriamiento del aire, a lo largo de los 11 m que ha de recorrer en la columna de secado.

II.1.1.4. *Sistema de recogida de productos*

Consta de dos partes fundamentales:

a) Sistema de toma de muestras.

Para la determinación de las pérdidas de peso sufridas por el producto, debidas al secado realizado en la columna, se hace necesario la toma de muestra. El producto ha de ser captado del interior de la columna, evitándose en lo posible las turbulencias adicionales a esta operación. Para ello se dispone de un tubo con orificios en su superficie, introducido horizontalmente en el tubo de secado, que puede ser accionado por un electroimán, presentándose o no los agujeros a la corriente gas-sólido y permitiéndose así la captura del producto.

b) Ciclón separador.

Permite la separación completa del aire y del producto a la salida de la columna de secado.

II.1.1.5. Regulación y registro de temperaturas

La regulación de la temperatura del aire de secado se lleva a cabo con la puesta o no en funcionamiento de algunos de los circuitos individuales del tren de calefacción. La medida de la temperatura a lo largo del tubo de secado se hace en cuatro puntos por medio de los correspondientes termómetros de resistencia, dispuestos en el interior de vainas metálicas que están colocadas en el seno de la corriente. Una al final del tren de calefacción y las otras tres a lo largo de la columna, dos al principio y al final de los tubos de calefacción auxiliar y la otra en el extremo superior de la columna.

El ajuste final de la temperatura deseada, se realiza por medio de la resistencia de calefacción conectada al autotransformador y que, por tanto, puede tener distintas tensiones de alimentación, (Fig. 33).

De esta forma puede conseguirse una buena regulación de la temperatura que se pone de manifiesto por medio de un registro de cuatro canales.

II.1.1.6. Determinación de tiempos de residencia

El tiempo de residencia del material en el tubo de secado tiene una gran importancia, pues permite las determinaciones de velocidad de secado de forma directa. Para conocer el tiempo de residencia de las partículas se han utilizado dos procedimientos.

a) Métodos fotográficos.

b) Métodos electrónicos.



FIGURA 33

Vista del panel de control, indicador de temperaturas, autotransformadores y osciloscopio para la recepción de señales de los detectores de tiempos de residencia.

a) El método fotográfico, para que suministre buenos resultados, necesita una gran perfección respecto al equipo que se emplee. Por ello es necesario la utilización de cámaras de alta velocidad y gran sensibilidad, para realizar una película de la trayectoria de algunas partículas y posteriormente, conocido el número de imágenes realizadas en la unidad de tiempo, poder determinar el tiempo transcurrido entre el paso de las partículas por dos puntos de la columna lo más alejados posible uno de otro con objeto de que la determinación sea más exacta. La utilización de iluminación súbita mandada por un estroboscopio es otra técnica que también requiere un equipo muy caro.

Un procedimiento que se pensó podría ser empleado, utiliza la cámara fotográfica normal con un pequeño tiempo de exposición y medida de la traza dejada por la partícula al desplazarse sobre la película, en el tiempo que permanece abierto el objetivo. Este método no dio buenos resultados y la medida es prácticamente imposible sobre las fotografías obtenidas.

b) En el procedimiento electrónico la determinación consiste en hacer medidas de la variación de señal de dos elementos sensibles, colocados en dos puntos de la columna, en función de la intensidad de luz que reciben. Si se miden estas variaciones en un registro de velocidad de salida del papel conocida, se puede determinar el tiempo de residencia por la distancia que se mide en el gráfico entre las dos señales recibidas.

Después de experimentar con fotorresistencias del tipo OAP - 12 se desecharon por falta de sensibilidad y se utilizaron como elementos sensibles fototransistores del tipo OCP - 70.

Las señales eran recogidas sobre un registro fotográfico que puede alcanzar una velocidad de salida del papel de hasta 50 cm/seg.

Cada circuito lleva un amplificador de dos etapas, que están acopladas por resistencia-capacidad. Las dos etapas están diferenciadas por el condensador de acoplamiento de 10 μ F. La etapa I es un amplificador normal pero con el fototransistor OCP-70 en lugar de un transistor de los que se utilizan normalmente en este servicio. El OCP-70 es el que producirá las variaciones de corriente, como consecuencia del cambio en la intensidad luminosa que recibe al pasar en un instante dado el producto ante el foco luminoso.

Las segundas etapas ejercen la función de amplificar consecuentemente la variación de intensidad de corriente. Se ha elegido el acoplamiento R-C por la facilidad de diseño y montaje. Sin embargo, presenta el inconveniente de originar pérdidas de acoplamiento en las redes de polarización, con lo cual, había que añadir nuevas etapas de amplificación ya que además la relación justa de amplificaciones es muy difícil de conseguir.

En el caso aquí estudiado, debido a que los límites tolerados por el registro son pequeños no es necesario aumentar el número de etapas, sino que basta aumentar algo la ganancia de la segunda etapa para compensar las pérdidas originadas por la no consecución de un acoplamiento total, (Fig. 34).

II.1.2. Descripción del equipo de lecho fluidizado

El equipo de lecho fluidizado está diseñado de acuerdo con el objeto del trabajo, de una forma sencilla y con los medios normales de que se dispone en un laboratorio de Ingeniería Química. Las partes fundamentales que se describen son las siguientes:

- Soplante (en general cualquier sistema que suministre aire con presión adecuada a la carga del lecho).

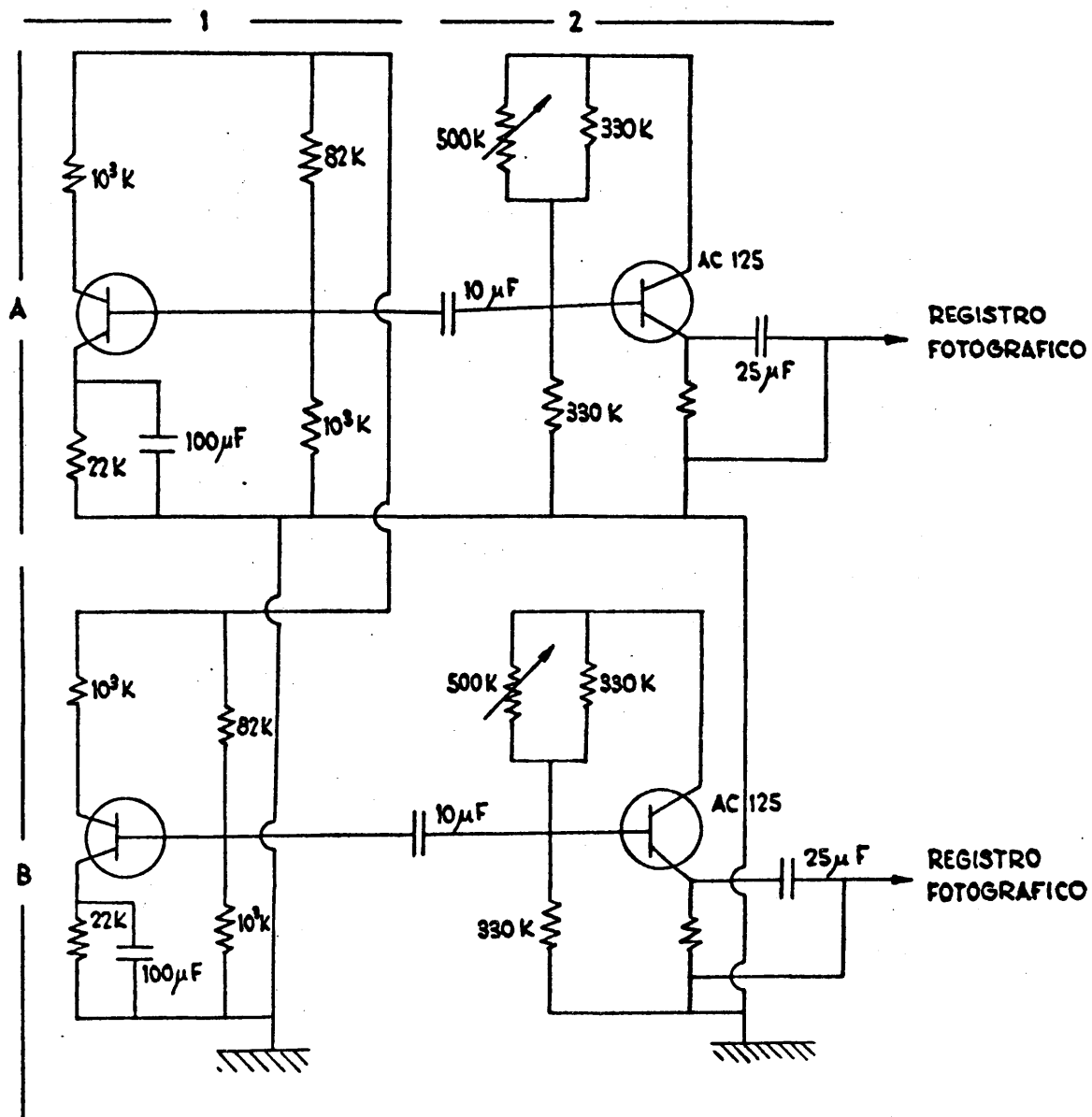


FIGURA 34

Circuito de detección de tiempos de residencia

- Medida y regulación del caudal de gas.
- Sistema de calefacción.
- Placa distribuidora.
- Lecho de fluidización.
- Sistema de alimentación.
- Toma de muestras.
- Medida de temperaturas.

II.1.2.1. Sistema de alimentación de aire

En el secadero que se instaló para realizar el estudio cinético se utilizó el aire procedente de la conducción general del laboratorio.

II.1.2.2. Medida y regulación del caudal de gas

Una vez que se alcanza la velocidad de fluidización, normalmente se trabaja a 2 ó 3 veces este caudal, para evitar el problema de reagrupación por tamaños que puede presentarse cuando la granulometría es variada. Sin embargo, durante la experimentación interesa trabajar siempre con caudales definidos de gas y por ello se precisa su regulación y medida.

El caudal de gas que alimenta al secadero, se controla por medio de una válvula de mariposa instalada en la conducción de 70 mm de diámetro. La medida del caudal se hace con una placa de orificio colocada en la conducción y lectura directa sobre un manómetro con agua o mercurio. En este caso, como en el de arrastre neumático, se dispone de una gama de placas con diferentes orificios para tener medidas lo más precisas posibles dentro de cada intervalo de caudales.

II.1.2.3. Calefacción

El sistema de calefacción está instalado en la conducción de aire. Está formado por tres piezas de material cerámico de unos 30 cm de longitud, sobre las cuales van enrolladas las resistencias eléctricas.

El sistema está desglosado en dos partes, una de ellas con alimentación de tensión directa y la otra con conexión a un autotransformador que permite la selección de la tensión de salida.

La regulación de la temperatura puede llevarse a cabo con una selección de los caudales así como por variación de la cantidad de calor suministrada por las resistencias. La medida de la temperatura se hace directamente por medio de un termómetro colocado en el seno del producto que fluidiza.

II.1.2.4. Placa distribuidora de gas

Aunque generalmente este tipo de accesorios no se detalla al describir un equipo, en el caso que aquí se trata, se cree de interés dedicarle alguna atención debido a su original diseño. El tipo utilizado ha sido desarrollado en la J.E.N. por A. Rodrigo.

Consta de treinta campanas metálicas de acero inoxidable, colocadas sobre un soporte plástico, que también puede ser metálico de 78 mm de diámetro, agujereadas centralmente por su parte inferior y con ocho finos taladros radiales que conectan con el canal inferior o de entrada de aire.

Con este tipo de placas distribuidoras y teniendo en cuenta la salida radial del aire, se consigue una magnífica fluidización cortando el cono de zonas muertas que se suele tener en puntos próximos a la pared con otros tipos de placas.

II.1.2.5. Lecho fluidizado

Está constituido por un tubo de vidrio de 400 mm de altura y 76 mm de diámetro.

El objeto del tubo de vidrio es comprobar que la fluidización es aceptable en todos los casos.

II.1.2.6. Alimentación del producto a secar

Cuando se hace trabajar cualquier equipo con la misión de obtener datos cinéticos en continuo, la forma de efectuar la alimentación resulta de capital importancia. En el sistema de lecho fluidizado utilizado en la experimentación, se han empleado tres métodos de alimentación:

El primero consiste en alimentar por medio de un tornillo sin fin, un caudal alto de producto húmedo. La granulometría del producto permitía la alimentación por la parte superior del lecho sin que se produjera arrastre de las partículas.

El segundo procedimiento alimentaba por cargas el lecho con producto húmedo.

Finalmente se eligió el procedimiento de agregar cantidades constantes de producto húmedo sobre un lecho de inerte que estaba a la temperatura deseada en cada caso.

II.1.2.7. Toma de muestras

Cuando el secadero funciona en régimen continuo la toma de muestras se puede realizar de tiempo en tiempo, tomando el producto que sale por el rebosadero.

Otra posibilidad con mayores garantías, consiste en retirar muestras del lecho de tiempo en tiempo. Esto se puede hacer soldando una pequeña caja para toma de muestras en el extremo de una varilla que se introduce por la parte superior del lecho.

II.1.2.8. *Medida de temperaturas*

En el interior de un lecho fluidizado, se tiene flujo de mezcla total para el gas y para el sólido, la forma más sencilla y precisa de medir la temperatura consiste en la introducción de un termómetro en el seno del lecho por un tubo de vidrio destinado a tal efecto.

II.2. TECNICAS EXPERIMENTALES

II.2.1. Descripción de una experiencia de secado en transporte neumático

Se comienza por dar paso a la alimentación de aire, mediante la puesta en marcha de la soplante, para lo que previamente se han de abrir las válvulas de entrada de agua al anillo hidráulico y para la refrigeración de los cojinetes. El sistema de válvulas es doble, para mantener una regulación permanente con una de ellas, mientras que la otra se abre o cierra totalmente dependiendo de que la bomba esté en marcha o parada.

La operación de puesta en marcha de la bomba es relativamente delicada, puesto que al funcionar por un sistema de anillo hidráulico, aire y agua abandonan la soplante al mismo tiempo, separándose después el agua en un ciclón. Si el caudal de agua que se utiliza para formar el anillo es muy

grande, puede llegar a anegarse el ciclón, penetrando el agua junto con el aire a través de las conducciones, con las consiguientes inundaciones en todos los sistemas. La bomba se mantiene en marcha durante un tiempo razonable antes de comenzar ninguna otra operación, para conseguir la estabilización del caudal.

Como ya se ha señalado antes, la regulación del caudal de aire, se hace por pérdida al ambiente con tres válvulas de distintos pasos, que permiten obtener con buena precisión el caudal deseado. En este momento, cuando ya se tiene un régimen estable de circulación, se conecta la calefacción, introduciendo tantos elementos de calefacción como se consideren necesarios para alcanzar la temperatura deseada. Al mismo tiempo se conecta la calefacción auxiliar. Se mantiene el equipo en estas condiciones hasta que se calienta la columna y se estabilizan las temperaturas. Las pequeñas variaciones que se quieran introducir, a partir de este momento, se efectúan variando la tensión de alimentación para un solo elemento de calefacción.

Conseguidas las condiciones estables de caudal y temperatura, se procede a la alimentación del producto a secar, previamente homogeneizado. Para ello, se introduce el producto húmedo en el tubo de alimentación y al mismo tiempo se toma una muestra que se coloca en un pesasustancias, se tapa rápidamente y se introduce en un desecador. En este momento se coloca el tubo de alimentación dentro de la columna de secado y rápidamente se abre la válvula que permite el paso de un pequeño caudal de aire, a una presión en la red de servicios de 8 a 10 Kg/cm², que impulsa al material soportado en la placa porosa, colocándole en la corriente de aire caliente prácticamente a la misma velocidad que ésta. El producto inicialmente seco, se humedece bien directamente con agua o haciendo pasar a través de él una corriente de aire húmedo.

El producto asciende por la columna y una fracción de él se recoge por medio del sistema de toma de muestra, cayendo directamente sobre un pesasustancias que se tapa e introduce inmediatamente en el desecador. El exceso de material a secar que no ha sido recogido en la toma de muestra, se separa en el ciclón y desciende a lo largo de una conducción hasta la parte inferior del secadero. Se repite el lanzamiento del material húmedo y la toma de muestra, hasta que se da por acabada la experimentación.

Simultáneamente están encendidos los focos luminosos que impresionan los fotodiodos y se reciben las señales emitidas sobre el registro fotográfico.

Terminada la experiencia se desconecta la calefacción y se deja pasar por algún tiempo el aire, con objeto de que enfrie la columna lentamente, cuando la temperatura de ésta es de unos 30°C, se cierran las válvulas de agua y se desconecta la bomba.

Inmediatamente, se procede a pesar los pesasustancias. Una vez pesados, se introducen en la estufa a una temperatura de 100 a 110°C, donde permanecen 24 horas con el fin de secar totalmente el producto. Se sacan de la estufa y se colocan en un desecador y siguiendo el procedimiento usual de pesada constante se obtiene el peso del pesasustancias con el producto seco.

Procediendo de esta forma, se podrá determinar después la cantidad de producto seco recogido y la cantidad de agua evaporada, estándose en condiciones de determinar la humedad de la muestra. Conocidas las humedades de entrada y salida del producto, por diferencia, se puede determinar el salto de humedad obtenido en el secadero.

Peso muestra seca = Peso del pesasustancias con muestra seca - Peso del pesasustancias.

Agua evaporada = Peso del pesasustancias con muestra
humeda - Peso del pesasustancias con
muestra seca.

$$\text{Humedad} = \frac{\text{Cantidad de agua evaporada (estufa)}}{\text{Peso de muestra seca}} \times 100$$

II.2.2. Descripción de una experiencia de secado en lecho fluidizado

Se comienza por obtener una alimentación de aire mediante la apertura de la válvula colocada en la conducción general de aire del laboratorio. A continuación se conecta la calefacción, que como ya se ha indicado se regula con un autotransformador, y se espera el tiempo necesario para tener una estabilización adecuada del caudal y la temperatura.

Durante el tiempo de estabilización, la columna ha estado cargada con un producto seco y la alimentación del producto a secar se realizó en un principio por medio de un tornillo sin fin y las muestras tomadas después del periodo de estabilización indicaron que el secado había sido total, por ello se abandonó este método de alimentación.

Posteriormente se intentó una forma de alimentación intermitente en el interior de la columna, pero el producto húmedo se aglomeraba dentro del lecho e inmediatamente se producían segregaciones y no se conseguía una buena fluidización, por lo cual este método también se desechó.

El método utilizado finalmente ha consistido en la alimentación de una determinada cantidad de producto húmedo sobre un lecho fluidizado cargado con producto seco y en lugar de tomar muestras en intervalos cortos de tiempo, que es prácticamente imposible debido a la rapidez del fenómeno de secado, se obtiene la variación de la temperatura del le

cho con el tiempo. A partir de esta variación se intentó me
diante correlaciones adecuadas estimar la velocidad de seca
do.

Concluida la experiencia se procede al cierre del aire
y la desconexión de las resistencias, se vacía el lecho y
se pesa para conocer en cada caso la carga total de inerte.

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Después de una experimentación previa para poner a punto los equipos, se seleccionó el sulfato sódico como producto más adecuado para realizar las series de experimentos.

Los productos que previamente se habían ensayado fueron:

Gel de sílice
Arenas de moldeo
Piedra pómez

A continuación se resumen en tablas los valores obtenidos para las velocidades de secado de sulfato sódico en transporte neumático, así como la determinación de tiempos de residencia y las variaciones de temperatura en cada intervalo de tiempo en el secadero de lecho fluidizado.

III.1. EXPERIENCIAS EN TRANSPORTE NEUMATICO

La experimentación de secado en transporte neumático se llevó a cabo con dos equipos diferentes en lo que al díametro del secadero se refiere. Para los ensayos realizados a baja temperatura se utilizó una columna de 100 mm de díametro y para las experiencias a altas temperaturas una de 36 mm de díametro.

III.1.1. Experiencias en la columna de 100 mm de diámetro

En las tablas 1 a 9 se recogen los valores de los resultados obtenidos experimentando a las temperaturas de 45, 55 y 65°C con tres caudales de arrastre diferentes y con cuatro humedades distintas. En las mismas tablas se ha indicado el valor de la velocidad de secado en sus dos vertientes, como salto de humedad por unidad de tiempo y referida a la humedad inicial del producto.

III.1.2. Columna de 36 mm de diámetro

Como ya se ha indicado en la técnica experimental la misión principal de la columna de vidrio (100 mm de diámetro) era permitir visualizar los efectos en el interior del secadero. Pero en el momento que se necesitó operar a temperaturas más elevadas esta columna no resultó apropiada.

Por ello los experimentos a 100°C se realizaron en una columna metálica de 36 mm de diámetro y 10.6 m de longitud y los resultados correspondientes se recogen en las tablas 10 a 15. Para evitar que el salto de humedad fuese tan grande que el producto llegase seco a la parte alta de la columna, los experimentos correspondientes a 175 y 250°C se realizaron en la misma columna pero con 5 m de longitud y los resultados obtenidos se muestran en las tablas 16 a 27.

NOTA. En las Tablas 1 a 9, el tamaño de las partículas sin clasificar es menor de 1 mm.

TABLA 1

Temperatura	°C	45°C
Caudal de aire	m ³ /s	3,47 x 10 ⁻²
Tamaño de partícula	μ	Sin clasificar
Tiempo medio de residencia	s	2,5

<div> <div> Humedad de entrada % H₀ </div> <div> Humedad de salida % H </div> <div> $\frac{H_0 - H}{\theta}$ </div> <div> $\frac{(H_0 - H)/H_0}{\theta}$ </div> </div>			
15,86	12,09	1,508	0,095
10,20	8,64	0,660	0,064
7,43	5,57	0,215	0,029
4,70	3,71	0,396	0,084

TABLA 2

Temperatura	°C	45°C
Caudal de aire	m ³ /s	4,83 x 10 ⁻²
Tamaño de partícula	μ	Sin clasificar
Tiempo medio de residencia	s	1,9

<div> Humedad de entrada % H_o </div>	<div> Humedad de salida % H </div>	<div> $H_o - H$ θ </div>	<div> $(H_o - H) / H_o$ θ </div>
11,50	10,56	0,4947	0,04302
9,49	8,58	0,4789	0,05046
8,18	7,16	0,5368	0,06563
6,16	5,41	0,3947	0,064074

TABLA 3

Temperatura	°C	45
Caudal de aire	m ³ /s	5,84 x 10 ⁻²
Tamaño de partícula	μ	Sin clasificar
Tiempo medio de residencia	s	1,4
Humedad de entrada % H _O	Humedad de salida % H	$\frac{H_0 - H}{\theta}$ $\frac{(H_0 - H)/H_0}{\theta}$
16,56	15,70	0,614 0,037
14,67	13,27	1,000 0,068
12,66	11,27	0,992 0,078
10,64	9,30	0,335 0,031

TABLA 4

Temperatura	°C	55
Caudal de aire	m ³ /s	3,47 x 10 ⁻²
Tamaño de partícula	μ	Sin clasificar
Tiempo medio de residencia	s	2,5
Humedad de entrada % H _O	Humedad de salida % H	$\frac{H_0 - H}{\theta}$ $\frac{(H_0 - H)/H_0}{\theta}$
17,07	12,67	0,103
10,87	8,67	0,081
7,30	5,43	0,102
4,23	2,93	0,120

TABLA 7

Temperatura		°C	65
Caudal de aire		m ³ /s	3,47 x 10 ⁻²
Tamaño de partícula		μ	Sin clasificar
Tiempo medio de residencia		s	2,5
Humedad de entrada % H ₀	Humedad de salida % H	$\frac{H_0 - H}{\theta}$	$\frac{(H_0 - H)/H_0}{\theta}$
14,83	6,60	3,292	0,222
5,67	2,97	1,080	0,190
1,90	0,60	0,520	0,273
0,35	0,12	0,092	0,262

TABLA 8

Temperatura	°C	65
Caudal de aire	m ³ /s	4,83 x 10 ⁻²
Tamaño de partícula	μ	Sin clasificar
Tiempo medio de residencia	s	1,9
Humedad de entrada % H ₀	Humedad de salida % H	$\frac{H_0 - H}{\theta}$ $\frac{(H_0 - H)}{H_0}$
15,49	13,31	1,1474 0,07407
9,20	6,76	1,3315 0,14333
3,59	3,09	0,26315 0,07330

TABLA 9

Temperatura		°C	65
Caudal de aire		m ³ /s	5,84 x 10 ⁻²
Tamaño de partícula		μ	Sin clasificar
Tiempo medio de residencia		s	1,4
Humedad de entrada % H _O	Humedad de salida % H	$\frac{H_O - H}{\theta}$	$\frac{(H_O - H)/H_O}{\theta}$
12,41	10,75	1,186	0,095
8,70	7,21	1,064	0,122
5,17	3,50	1,193	0,231
1,92	1,04	---	---

TABLA 10

Temperatura	°C	100	
Caudal de aire	m ³ /s	0,62 x 10 ⁻²	
Tamaño de partícula	μ	650	
Tiempo medio de residencia	s	10	
Humedad de entrada % H _O	Humedad de salida % H	$\frac{H_O - H}{\theta}$	$\frac{(H_O - H)/H_O}{\theta}$
16,9	0,8	1,61	0,095
14,2	0,1	1,41	0,099
10,2	0,3	0,99	0,097

TABLA 11

Temperatura	°C	100
Caudal de aire	m ³ /s	0,62 x 10 ⁻²
Tamaño de partícula	μ	410
Tiempo medio de residencia	s	5,2
Humedad de entrada % H ₀	Humedad de salida % H	$\frac{H_0 - H}{\theta}$ (H ₀ - H)/H ₀
17,1	0,7	3,154 0,184
11,9	0,1	2,260 0,191
8,8	0,7	1,557 0,177

TABLA 12

Temperatura	°C	100
Caudal de aire	m ³ /s	0,62 x 10 ⁻²
Tamaño de partícula	μ	265
Tiempo medio de residencia	s	3,6
Humedad de entrada % H ₀	Humedad de salida % H	$\frac{H_0 - H}{\theta}$ (H ₀ - H)/H ₀
13,3	1,0	3,40 0,257
9,2	0,4	2,44 0,265
6,9	1,5	1,50 0,217

TABLA 13

Temperatura		°C	100
Caudal de aire		m ³ /s	0,75 x 10 ⁻²
Tamaño de partícula		μ	650
Tiempo medio de residencia		s	4,7
Humedad de entrada % H ₀	Humedad de salida % H	$\frac{H_0 - H}{\theta}$	$\frac{(H_0 - H)/H_0}{\theta}$
16,9	1,3	3,319	0,196
14,2	1,0	2,808	0,198
10,3	3,0	1,550	0,151

TABLA 14

Temperatura		°C	100
Caudal de aire		m ³ /s	0,75 x 10 ⁻²
Tamaño de partícula		μ	410
Tiempo medio de residencia		s	4,5
Humedad de entrada % H ₀	Humedad de salida % H	$\frac{H_0 - H}{\theta}$	$\frac{(H_0 - H)/H_0}{\theta}$
17,0	4,9	2,91	0,171
11,7	1,7	2,22	0,190
8,3	4,1	0,933	0,112

TABLA 15

Temperatura		°C	100
Caudal de aire		m ³ /s	0,75 x 10 ⁻²
Tamaño de partícula		μ	265
Tiempo medio de residencia		s	3,7
Humedad de entrada % H _O	Humedad de salida % H	$\frac{H_O - H}{\theta}$	$\frac{(H_O - H)/H_O}{\theta}$
17,1	9,4	2,08	0,122
9,7	5,9	1,03	0,106
6,8	4,1	0,27	0,04

TABLA 16

Temperatura		°C	175
Caudal de aire		m ³ /s	0,62 x 10 ⁻²
Tamaño de partícula		μ	650
Tiempo medio de residencia		s	3,04
Humedad de entrada % H _O	Humedad de salida % H	$\frac{H_O - H}{\theta}$	$\frac{(H_O - H)/H_O}{\theta}$
15,0	13,5	0,822	0,055
11,4	8,8	0,855	0,075
11,2	9,4	0,592	0,053

TABLA 17

Temperatura	°C	175	
Caudal de aire	m ³ /s	0,62 x 10 ⁻²	
Tamaño de partícula	μ	410	
Tiempo medio de residencia	s	1,6	
Humedad de entrada % H ₀	Humedad de salida % H	$\frac{H_0 - H}{\theta}$	$\frac{(H_0 - H)/H_0}{\theta}$
16,7	14,9	1,125	0,067
11,0	8,8	1,375	0,125
8,5	6,8	1,062	0,125

TABLA 18

Temperatura	°C	175	
Caudal de aire	m ³ /s	0,62 x 10 ⁻²	
Tamaño de partícula	μ	265	
Tiempo medio de residencia	s	1,1	
Humedad de entrada % H ₀	Humedad de salida % H	$\frac{H_0 - H}{\theta}$	$\frac{(H_0 - H)/H_0}{\theta}$
21,7	19,4	2,09	0,096
10,4	7,5	2,63	0,250
7,4	5,9	1,36	0,180

TABLA 19

Temperatura	°C	175
Caudal de aire	m ³ /s	0,75 x 10 ⁻²
Tamaño de partícula	μ	650
Tiempo medio de residencia	s	1,4
Humedad de entrada % H _O	Humedad de salida % H	$\frac{H_O - H}{\theta}$ $\frac{(H_O - H)/H_O}{\theta}$
15,0	13,8	0,857 0,057
13,3	11,3	1,428 0,107
10,6	9,4	0,857 0,081

TABLA 20

Temperatura	°C	175	
Caudal de aire	m ³ /s	0,75 x 10 ⁻²	
Tamaño de partícula	μ	410	
Tiempo medio de residencia	s	1,37	
Humedad de entrada % H ₀	Humedad de salida % H	$\frac{H_0 - H}{\theta}$	$\frac{(H_0 - H)/H_0}{\theta}$
15,1	14,0	0,803	0,053
11,0	8,8	1,606	0,146
8,5	8,0	0,365	0,043

TABLA 21

Temperatura	°C	175
Caudal de aire	m ³ /s	0,75 x 10 ⁻²
Tamaño de partícula	μ	265
Tiempo medio de residencia	s	1,12
Humedad de entrada % H _O	Humedad de salida % H	$\frac{H_O - H}{\theta}$ $\frac{(H_O - H)/H_O}{\theta}$
19,3	17,3	1,786 0,092
12,3	9,5	2,500 0,203
7,5	7,1	0,357 0,047

TABLA 22

Temperatura	°C	250	
Caudal de aire	m ³ /s	0,62 x 10 ⁻²	
Tamaño de partícula	μ	650	
Tiempo medio de residencia	s	2,6	
Humedad de entrada % H ₀	Humedad de salida % H	$\frac{H_0 - H}{\theta}$	$\frac{(H_0 - H)/H_0}{\theta}$
17,7	14,1	1,385	0,078
13,9	11,9	0,769	0,055
9,6	6,9	1,038	0,108

TABLA 25

Temperatura	°C	250	
Caudal de aire	m ³ /s	0,75 x 10 ⁻²	
Tamaño de partícula	μ	650	
Tiempo medio de residencia	s	1,22	
Humedad de entrada % H ₀	Humedad de salida % H	$\frac{H_0 - H}{\theta}$	$\frac{(H_0 - H)/H_0}{\theta}$
16,8	14,0	2,295	0,136
11,8	11,3	0,410	0,035
9,9	9,3	0,492	0,0497

TABLA 26

Temperatura		°C	250
Caudal de aire		m ³ /s	0,75 x 10 ⁻²
Tamaño de partícula		μ	410
Tiempo medio de residencia		s	1,17
Humedad de entrada H _O	Humedad de salida H	$\frac{H_O - H}{\theta}$	$\frac{(H_O - H)/H_O}{\theta}$
13,1	11,6	1,282	0,098
10,5	9,1	1,196	0,114
8,3	7,6	0,598	0,072

TABLA 27

Temperatura		°C	250
Caudal de aire		m ³ /s	0,75 x 10 ⁻²
Tamaño de partícula		μ	265
Tiempo medio de residencia		s	0,96
Humedad de entrada % H_0	Humedad de salida % H	$\frac{H_0 - H}{\theta}$	$\frac{(H_0 - H)}{H_0}$ θ
17,0	16,5	0,521	0,031
12,1	10,1	2,083	0,172
5,4	4,8	0,625	0,116

III.1.3. Tiempos de residencia

La determinación de tiempos de residencia del producto en el secadero, para distintos tamaños, caudales y humedades se hizo tomando como referencia 100°C para temperaturas altas y a 55°C para temperaturas bajas.

En las tablas 28 y 29 se recogen los valores que se obtuvieron indicándose con C, M y F, el tiempo inicial, medio y final respectivamente, todos ellos en segundos.

En la tabla 30 se muestran los valores de referencia utilizados para los tiempos de residencia según los tamaños de grano de las partículas.

TABLA 28

Tiempos de Residencia

Caudal m ³ /s	Malla μ	Humedad %	Tiempo		
			C	M	F
0,62·10 ⁻²	800-500	14,2	5	11,5	18
0,62·10 ⁻²	320-210	7	3	4	5
0,62·10 ⁻²	320-210	6,9	3	3,5	4,5
0,62·10 ⁻²	800-500	17	6	9	15
0,62·10 ⁻²	800-500	17	6	8,5	15
0,62·10 ⁻²	500-320	17	3,5	4,5	6,5
0,62·10 ⁻²	500-320	17	3,5	5	6,5
0,62·10 ⁻²	320-210	9,2	3	3,5	4
0,62·10 ⁻²	500-320	8,8	4	5,5	7
0,62·10 ⁻²	500-320	8,8	4,5	6,5	9
0,62·10 ⁻²	500-320	8,8	4	5	7,5
0,62·10 ⁻²	800-500	10,2	7	11	15
0,62·10 ⁻²	800-500	10,2	6	9,5	12
0,62·10 ⁻²	500-320	11,9	4	6	8

TABLA 29

Tiempos de Residencia

Caudal m ³ /s	Malla μ	Humedad %	Tiempo		
			C	M	F
0,75·10 ⁻²	800-500	14,2	3	5	7
0,75·10 ⁻²	800-500	14,2	3	4,5	6,5
0,75·10 ⁻²	320-210	9,2	2,5	4	5,5
0,75·10 ⁻²	320-210	9,2	2	3,5	5
0,75·10 ⁻²	500-320	17	3	4,5	6
0,75·10 ⁻²	500-320	17	2,5	4,5	5,5
0,75·10 ⁻²	800-500	16,9	3	4	6
0,75·10 ⁻²	800-500	16,9	3	4	6
0,75·10 ⁻²	320-210	6,8	2,5	4	5
0,75·10 ⁻²	320-210	9,2	2	3	4
0,75·10 ⁻²	800-500	10,2	4	5,5	7,5
0,75·10 ⁻²	320-210	6,8	2	4	5
0,62·10 ⁻²	800-500	14,2	6,5	11,5	17
0,75·10 ⁻²	800-500	10,2	3,5	4,5	7
0,75·10 ⁻²	500-320	11,7	2,5	4,5	6
0,75·10 ⁻²	500-320	11,7	2,5	4,5	6
0,75·10 ⁻²	800-500	10,2	3	5	7
0,75·10 ⁻²	500-320	8,8	3	4,5	6
0,75·10 ⁻²	500-320	8,8	3	5	6

TABLA 30

Valores patrones del tiempo de residencia

	$0,75 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sg}$	$0,62 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sg}$
650 μ	4,7 sg	10,0 sg
410 μ	4,5 sg	5,2 sg
265 μ	3,7 sg	3,7 sg

III.2. EXPERIENCIAS EN LECHO FLUIDIZADO

En las tablas 31 a 120, se han recogido los resultados correspondientes a la variación de temperatura a distintos intervalos de tiempo, para el caso de lecho fluidizado.

En las tablas se muestran los valores de la temperatura, tamaño de partícula, carga añadida y humedad media del producto. Las temperaturas ensayadas, igual que en el caso del transporte neumático, han sido 45, 55, 65, 100, 175 y 250°C y los tamaños 650, 410 y 265 micras.

NOTA. En las tablas 31 a 66, el tamaño de las partículas sin clasificar es menor de 1 mm.

TABLA 31

Temperatura		°C	45
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho		g	90,5
Carga húmeda añadida		g	2
Humedad del producto		%	15,98
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	45	30	42,5
5	44	35	43
10	43	40	43
15	42	45	---
20	41,5	50	---
25	42	55	---

TABLA 32

Temperatura	°C	55	
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³	
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar	
Carga inerte en el lecho	g	90,5	
Carga húmeda añadida	g	2	
Humedad del producto	%	15,98	
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	55	30	53
5	54	35	53,5
10	53	40	54
15	52	45	54
20	52	50	54,5
25	52,5	55	55

TABLA 33

Temperatura	°C	65
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	2
Humedad del producto	%	15,98
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s
0	65	30
5	64	35
10	62	40
15	61,5	45
20	61,5	50
25	62	55
		64

TABLA 34

Temperatura	°C	45
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	5
Humedad del producto	%	15,98
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s
0	45	30
5	42	35
10	40	40
15	38	45
20	37	50
25	36	55
		40

TABLA 35

Temperatura	°C	55
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	5
Humedad del producto	%	15,98

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	55	30	50,5
5	52,5	35	51
10	51	40	52
15	50	45	52
20	49,5	50	52,5
25	50	55	53

TABLA 36

Temperatura	°C	65
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	5
Humedad del producto	%	15,98

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	65	30	61
5	63	35	61,5
10	61	40	62
15	60	45	62,5
20	60	50	63
25	60	55	63

TABLA 37

Temperatura	°C	45
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	5
Humedad del producto	%	11,83

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	45	30	42
5	44	35	42
10	43	40	42
15	42	45	42,5
20	41,5	50	43
25	41,5	55	43

TABLA 38

Temperatura	°C	55
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	5
Humedad del producto	%	11,83

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	55	30	52
5	53,5	35	52,5
10	52	40	53
15	51,5	45	53
20	51,5	50	53,5
25	52	55	54

TABLA 39

Temperatura	°C	65
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	5
Humedad del producto	%	11,83
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s
0	65	30
5	63,5	35
10	62	40
15	61,5	45
20	62	50
25	62	55
		Temperatura °C
		62,5
		63
		63,5
		64
		64
		64

TABLA 40

Temperatura	°C	45
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	5
Humedad del producto	%	9,22
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s
0	45	30
5	43	35
10	42,5	40
15	42	45
20	42	50
25	42,5	55
		Temperatura °C
		42,5
		43
		43
		43,5
		43,5
		44

TABLA 41

Temperatura		°C	55
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho		g	90,5
Carga húmeda añadida		g	5
Humedad del producto		%	9,22
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	55	30	53
5	53,5	35	53
10	52,5	40	53,5
15	52	45	54
20	52	50	54
25	52,5	55	54

TABLA 42

Temperatura	°C	65
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	5
Humedad del producto	%	9,22

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	65	30	63
5	63,5	35	63
10	62	40	63,5
15	61,5	45	64
20	62	50	64
25	62	55	64

TABLA 43

Temperatura		°C	45
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho		g	90,5
Carga húmeda añadida		g	10
Humedad del producto		%	11,83
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	45	30	35
5	42	35	35,5
10	38	40	36
15	35	45	37
20	34	50	38
25	34	55	39,5

TABLA 44

Temperatura	°C	55	
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³	
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar	
Carga inerte en el lecho	g	90,5	
Carga húmeda añadida	g	10	
Humedad del producto	%	11,83	
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	55	30	42
5	52	35	44
10	45	40	45
15	41	45	46
20	40	50	47
25	40,5	55	48

TABLA 45

Temperatura		°C	65
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho		g	90,5
Carga húmeda añadida		g	10
Humedad del producto		%	11,83
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	65	30	52
5	62	35	54
10	55	40	55,5
15	50	45	57
20	49	50	58
25	50	55	59

TABLA 46

Temperatura	°C	45
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	10
Humedad del producto	%	9,22

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	45	30	37,5
5	41	35	38
10	38	40	39
15	36,5	45	39,5
20	36	50	40,5
25	36,5	55	41

TABLA 47

Temperatura	°C	55	
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³	
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar	
Carga inerte en el lecho	g	90,5	
Carga húmeda añadida	g	10	
Humedad del producto	%	9,22	
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	55	30	47,5
5	50	35	48
10	47	40	49
15	46	45	49
20	46	50	50
25	46,5	55	50,5

TABLA 48

Temperatura		°C	65
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho		g	90,5
Carga húmeda añadida		g	10
Humedad del producto		%	9,22
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	65	30	58
5	62,5	35	59
10	58	40	59,5
15	57	45	60
20	57	50	60,5
25	57,5	55	61

TABLA 49

Temperatura		°C	45
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho		g	90,5
Carga húmeda añadida		g	20
Humedad del producto		%	15,98
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	45	30	30
5	40,5	35	29
10	36	40	29,5
15	34	45	29,5
20	32	50	30
25	30,5	55	30,5

TABLA 50

Temperatura		°C	55
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho		g	90,5
Carga húmeda añadida		g	20
Humedad del producto		%	15,98

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	55	30	35
5	49,5	35	34,5
10	45	40	35
15	40,5	45	35,5
20	37,5	50	37
25	35,5	55	38

TABLA 51

Temperatura		°C	65
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho		g	90,5
Carga húmeda añadida		g	20
Humedad del producto		%	15,98
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	65	30	41
5	56	35	43
10	51	40	46,5
15	44	45	49
20	41	50	52
25	40	55	53

TABLA 52

Temperatura	°C	45	
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³	
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar	
Carga inerte en el lecho	g	90,5	
Carga húmeda añadida	g	20	
Humedad del producto	%	11,83	
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	45	30	30
5	42,5	35	29,5
10	38	40	29,5
15	34,5	45	29,5
20	32	50	30
25	31	55	30,5

TABLA 33

Temperatura	°C	55
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	20
Humedad del producto	%	11,83
Tiempo s	Temperatura °C	Temperatura °C
0	55	30
5	52	35
10	45	40
15	40,5	45
20	37	50
25	35	55
		34,5
		35
		37,5
		39
		40,5
		42

TABLA 54

Temperatura	°C	65
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	20
Humedad del producto	%	11,83
Tiempo s	Temperatura °C	Temperatura °C
0	65	30
5	61	35
10	54	40
15	47	45
20	43	50
25	41,5	55
		41,5
		43
		44,5
		46
		48
		50

TABLA 55

Temperatura		°C	45
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho		g	90,5
Carga húmeda añadida		g	20
Humedad del producto		%	9,22
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	45	30	37,5
5	43	35	38
10	40	40	38,5
15	38	45	39
20	37	50	39,5
25	37	55	40

TABLA 56

Temperatura	°C	55	
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³	
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar	
Carga inerte en el lecho	g	90,5	
Carga húmeda añadida	g	20	
Humedad del producto	%	9,22	
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	55	30	39
5	51,5	35	40
10	46	40	41,5
15	41	45	42,5
20	39,5	50	44
25	38,5	55	45

TABLA 57

Temperatura		°C	65
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho		g	90,5
Carga húmeda añadida		g	20
Humedad del producto		%	9,22
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	65	30	50
5	60	35	51,5
10	55	40	53
15	49	45	54
20	48	50	55
25	48,5	55	56

TABLA 58

Temperatura	°C	45
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	20
Humedad del producto	%	5

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	45	30	40
5	42	35	40,5
10	39	40	41
15	38	45	42
20	38	50	42
25	39	55	42,5

TABLA 59

Temperatura	°C	55
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	20
Humedad del producto	%	5
Tiempo s	Temperatura °C	Temperatura °C
0	55	49
5	50	50
10	47	51
15	46	51
20	47	51,5
25	48	52

TABLA 60

Temperatura	°C	65
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	20
Humedad del producto	%	5
Tiempo s	Temperatura °C	Temperatura °C
0	65	60
5	61	61
10	59	61,5
15	58	62
20	58	62
25	59	62,5

TABLA 61

Temperatura	°C	45
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	50
Humedad del producto	%	15,98
Tiempo s	Temperatura °C	Temperatura °C
0	45	26
5	38	25
10	34	24,5
15	31	24
20	28	24
25	27	23

TABLA 62

Temperatura	°C	55
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	50
Humedad del producto	%	15,98
Tiempo s	Temperatura °C	Temperatura °C
0	55	30
5	45	29
10	40	28,5
15	36	28
20	33	28
25	31	28

TABLA 63

Temperatura	°C	65
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	50
Humedad del producto	%	15,98
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s
0	65	30
5	59	35
10	50	40
15	45	45
20	40	50
25	38	55
		Temperatura °C
		36
		35
		36
		37
		38
		40

TABLA 64

Temperatura	°C	45
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	100
Humedad del producto	%	15,98
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s
0	45	30
5	37	35
10	32	40
15	30	45
20	28	50
25	27	55
		Temperatura °C
		26
		25
		24
		23,5
		23
		23

TABLA 65

Temperatura	°C	55
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	100
Humedad del producto	%	15,98

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	55	30	28,5
5	41	35	28
10	35	40	27,5
15	32	45	27
20	30	50	26,5
25	29	55	26,5

TABLA 66

Temperatura	°C	65
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	Sin Clasificar
Carga inerte en el lecho	g	90,5
Carga húmeda añadida	g	100
Humedad del producto	%	15,98

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	65	30	30
5	45	35	30
10	38	40	30
15	34	45	29
20	33	50	29
25	31	55	29

TABLA 67

Temperatura	°C	100	
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³	
Tamaño de partícula	μ	650	
Carga inerte en el lecho	g	94	
Carga húmeda añadida	g	5	
Humedad del producto	%	14,06	
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	100	30	95
5	97	35	95
10	95	40	96
15	93,5	45	96,5
20	94	50	96,5
25	94,5	55	97,5

TABLA 68

Temperatura		°C	100
Caudal de aire		m ³ /s	5,33 · 10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	650
Carga inerte en el lecho		g	94
Carga húmeda añadida		g	20
Humedad del producto		%	14,06
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	100	30	79
5	92	35	81
10	85	40	82,5
15	80	45	84
20	78,5	50	86
25	78	55	87,5

TABLA 69

Temperatura	°C	100	
Caudal de aire	m ³ /s	5,33 · 10 ⁻³	
Tamaño de partícula	μ	650	
Carga inerte en el lecho	g	112	
Carga húmeda añadida	g	5	
Humedad del producto	%	11,60	
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	100	30	95,5
5	97	35	96
10	95	40	96,5
15	94,5	45	97
20	94,5	50	97
25	95	55	97,5

TABLA 70

Temperatura	°C	100	
Caudal de aire	m ³ /s	5,33 · 10 ⁻³	
Tamaño de partícula	μ	650	
Carga inerte en el lecho	g	112	
Carga húmeda añadida	g	20	
Humedad del producto	%	11,60	
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	100	30	82
5	93	35	83
10	88	40	85
15	85	45	86
20	82	50	87,5
25	81	55	89

TABLA 71

Temperatura	°C	100
Caudal de aire	m ³ /s	5,33 · 10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	650
Carga inerte en el lecho	g	102
Carga húmeda añadida	g	5
Humedad del producto	%	8,74

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	100	30	97
5	97	35	97,5
10	96	40	97,5
15	95,5	45	98
20	95,5	50	98
25	96	55	98

TABLA 72

Temperatura	°C	100
Caudal de aire	m ³ /s	5,33 · 10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	650
Carga inerte en el lecho	g	102
Carga húmeda añadida	g	20
Humedad del producto	%	8,74

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	100	30	86
5	95	35	87,5
10	90	40	88
15	86	45	90
20	85	50	91
25	85	55	92

TABLA 73

Temperatura	°C	100
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	410
Carga inerte en el lecho	g	94
Carga húmeda añadida	g	5
Humedad del producto	%	11,49
Tiempo s	Temperatura °C	Temperatura °C
0	100	94,5
5	96	95
10	93	96
15	93	96,5
20	93,5	97
25	94	97

TABLA 74

Temperatura	°C	100
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	410
Carga inerte en el lecho	g	94
Carga húmeda añadida	g	20
Humedad del producto	%	11,49
Tiempo s	Temperatura °C	Temperatura °C
0	100	80
5	92	82
10	85	83,5
15	80	85
20	78,5	87
25	79	88,5

TABLA 75

Temperatura		°C	100
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	410
Carga inerte en el lecho		g	78
Carga húmeda añadida		g	5
Humedad del producto		%	10,04
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	100	30	96
5	97	35	96,5
10	96	40	97
15	95,5	45	97
20	95,5	50	97,5
25	96	55	97,5

TABLA 76

Temperatura		°C	100
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	410
Carga inerte en el lecho		g	78
Carga húmeda añadida		g	20
Humedad del producto		%	10,04
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	100	30	78
5	85	35	80
10	79	40	81
15	77	45	83
20	76	50	84,5
25	77	55	86

TABLA 77

Temperatura	°C	100	
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³	
Tamaño de partícula	μ	410	
Carga inerte en el lecho	g	100	
Carga húmeda añadida	g	5	
Humedad del producto	%	7,68	
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	100	30	96
5	96	35	97
10	95	40	97
15	95	45	98
20	95	50	98
25	96	55	98

TABLA 78

Temperatura		°C	100
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	410
Carga inerte en el lecho		g	100
Carga húmeda añadida		g	20
Humedad del producto		%	7,68
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	100	30	90,5
5	90	35	91,5
10	89	40	93
15	88	45	93
20	88,5	50	94,5
25	89	55	95

TABLA 79

Temperatura		°C	100
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	265
Carga inerte en el lecho		g	73
Carga húmeda añadida		g	5
Humedad del producto		%	10,5
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	100	30	98,5
5	98	35	98,5
10	97	40	98,5
15	97	45	99
20	97,5	50	99
25	98	55	99

TABLA 80

Temperatura	°C	100	
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³	
Tamaño de partícula	μ	265	
Carga inerte en el lecho	g	73	
Carga húmeda añadida	g	20	
Humedad del producto	%	10,5	
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	100	30	94
5	95	35	95
10	93	40	95
15	92	45	95,5
20	92	50	95,5
25	93	55	96

TABLA 81

Temperatura		°C	100
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	265
Carga inerte en el lecho		g	81
Carga húmeda añadida		g	5
Humedad del producto		%	10,14
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	100	30	96,5
5	98	35	97
10	96	40	97
15	96	45	97,5
20	96,5	50	97,5
25	96,5	55	97,5

TABLA 82

Temperatura		°C	100
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	265
Carga inerte en el lecho		g	81
Carga húmeda añadida		g	20
Humedad del producto		%	10,14
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	100	30	87,5
5	95	35	88
10	90	40	89,5
15	86	45	90,5
20	86	50	91,5
25	87	55	92

TABLA 83

Temperatura			°C	100
Caudal de aire			m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula			μ	265
Carga inerte en el lecho			g	90
Carga húmeda añadida			g	5
Humedad del producto			%	6,79
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C	
0	100	30	98	
5	98	35	98	
10	96	40	98	
15	96	45	98	
20	97	50	98	
25	97,5	55	98	

TABLA 84

Temperatura			°C	100
Caudal de aire			m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula			μ	265
Carga inerte en el lecho			g	90
Carga húmeda añadida			g	20
Humedad del producto			%	6,79
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C	
0	100	30	92,5	
5	95	35	93	
10	92	40	93	
15	91	45	94	
20	91	50	94,5	
25	92	55	95	

TABLA 85

Temperatura	°C	175	
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³	
Tamaño de partícula	μ	650	
Carga inerte en el lecho	g	91	
Carga húmeda añadida	g	5	
Humedad del producto	%	12,86	
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	175	30	167
5	170	35	168,5
10	167	40	169,5
15	166	45	170
20	166	50	170,5
25	166,5	55	171

TABLA 86

Temperatura	°C	175	
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³	
Tamaño de partícula	μ	650	
Carga inerte en el lecho	g	91	
Carga húmeda añadida	g	20	
Humedad del producto	%	12,86	
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	175	30	152
5	163	35	153,5
10	153	40	155,5
15	149	45	158
20	148	50	160
25	149,5	55	161

TABLA 87

Temperatura	°C	175	
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³	
Tamaño de partícula	μ	650	
Carga inerte en el lecho	g	67	
Carga húmeda añadida	g	5	
Humedad del producto	%	10,25	
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	175	30	169,5
5	170	35	170,5
10	167	40	170,5
15	167,5	45	171
20	168	50	171,5
25	168,5	55	172

TABLA 88

Temperatura	°C	175
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	650
Carga inerte en el lecho	g	67
Carga húmeda añadida	g	20
Humedad del producto	%	10,25

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	175	30	157
5	162	35	160
10	155	40	161
15	153	45	163
20	154	50	165
25	155	55	167

TABLA 89

Temperatura	°C	175	
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³	
Tamaño de partícula	μ	650	
Carga inerte en el lecho	g	80	
Carga húmeda añadida	g	5	
Humedad del producto	%	9,41	
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	175	30	173
5	173	35	173
10	171	40	173,5
15	172	45	173,5
20	172	50	173,8
25	172,5	55	174

TABLA 90

Temperatura		°C	175
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	650
Carga inerte en el lecho		g	80
Carga húmeda añadida		g	20
Humedad del producto		%	9,41
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	175	30	161
5	165	35	162,5
10	160	40	164,5
15	159	45	165,5
20	158,5	50	165,5
25	160,5	55	167,5

TABLA 91

Temperatura	°C	175
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	410
Carga inerte en el lecho	g	97
Carga húmeda añadida	g	5
Humedad del producto	%	11,56

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	175	30	168
5	168	35	169
10	166	40	170
15	166	45	170,5
20	166,5	50	171,5
25	167	55	172

TABLA 92

Temperatura	°C	175
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	410
Carga inerte en el lecho	g	97
Carga húmeda añadida	g	20
Humedad del producto	%	11,56

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	175	30	144
5	156	35	146
10	148	40	148
15	144	45	150
20	143	50	153
25	143	55	154

TABLA 93

Temperatura	°C	175
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	410
Carga inerte en el lecho	g	84
Carga húmeda añadida	g	5
Humedad del producto	%	7,83

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	175	30	170,5
5	170	35	171
10	168	40	172,5
15	168	45	173
20	169	50	173
25	170	55	173,5

TABLA 94

Temperatura	°C	175
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	410
Carga inerte en el lecho	g	84
Carga húmeda añadida	g	20
Humedad del producto	%	7,83

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	175	30	157
5	160	35	159
10	154	40	160,5
15	152	45	162
20	153,5	50	163
25	155	55	164

TABLA 95

Temperatura	°C	175	
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³	
Tamaño de partícula	μ	410	
Carga inerte en el lecho	g	79	
Carga húmeda añadida	g	5	
Humedad del producto	%	7,65	
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	175	30	171
5	170	35	171,5
10	169	40	171,5
15	169	45	172
20	170	50	172
25	170,5	55	172,5

TABLA 96

Temperatura	°C	175	
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³	
Tamaño de partícula	μ	410	
Carga inerte en el lecho	g	79	
Carga húmeda añadida	g	20	
Humedad del producto	%	7,65	
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	175	30	158
5	157	35	160
10	154	40	162
15	153	45	163
20	154	50	164,5
25	156	55	165,5

TABLA 97

Temperatura		°C	175
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	265
Carga inerte en el lecho		g	97
Carga húmeda añadida		g	5
Humedad del producto		%	12,21
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	175	30	165,5
5	167	35	166
10	165,5	40	167
15	164,5	45	167,5
20	164,5	50	167,5
25	164,5	55	168,5

TABLA 98

Temperatura	°C	175
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	265
Carga inerte en el lecho	g	97
Carga húmeda añadida	g	20
Humedad del producto	%	12,21

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	175	30	149
5	160	35	151
10	152	40	152,5
15	148	45	155
20	146,5	50	157
25	147,5	55	158,5

TABLA 99

Temperatura		°C	175
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	265
Carga inerte en el lecho		g	60
Carga húmeda añadida		g	5
Humedad del producto		%	5,09
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	175	30	173
5	173	35	173
10	173	40	173
15	172,5	45	173
20	172,5	50	173,5
25	172,5	55	173,5

TABLA 100

Temperatura		°C	175
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	265
Carga inerte en el lecho		g	60
Carga húmeda añadida		g	20
Humedad del producto		%	5,09
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	175	30	166,5
5	168	35	167
10	165	40	168
15	164	45	169
20	164	50	170
25	165,5	55	170

TABLA 101

Temperatura	°C	175
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	265
Carga inerte en el lecho	g	71
Carga húmeda añadida	g	5
Humedad del producto	%	1,46

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	175	30	172
5	172	35	172
10	171	40	172,5
15	171,5	45	172,5
20	171,5	50	172,5
25	172	55	173

TABLA 102

Temperatura	°C	175	
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³	
Tamaño de partícula	μ	265	
Carga inerte en el lecho	g	71	
Carga húmeda añadida	g	20	
Humedad del producto	%	1,46	
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	175	30	167
5	168	35	168
10	166,5	40	169
15	166	45	169,5
20	166,5	50	170,5
25	166,5	55	171

TABLA 103

Temperatura	°C	250
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	650
Carga inerte en el lecho	g	86
Carga húmeda añadida	g	5
Humedad del producto	%	16,31

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	250	30	242
5	245	35	242,5
10	243	40	243
15	241,5	45	243
20	241,5	50	243,5
25	240,5	55	244

TABLA 104

Temperatura	°C	250
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	650
Carga inerte en el lecho	g	86
Carga húmeda añadida	g	20
Humedad del producto	%	16,31

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	250	30	217
5	230	35	220
10	220	40	223
15	214	45	225
20	212,5	50	228
25	214	55	230

TABLA 105

Temperatura		°C	250
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	650
Carga inerte en el lecho		g	72
Carga húmeda añadida		g	5
Humedad del producto		%	13,77
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	250	30	241
5	244	35	241,5
10	242	40	242
15	241	45	242
20	240	50	243
25	240,5	55	243,5

TABLA 106

Temperatura	°C	250
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	650
Carga inerte en el lecho	g	72
Carga húmeda añadida	g	20
Humedad del producto	%	13,77

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	250	30	219
5	235	35	221
10	223	40	223
15	218	45	226
20	217	50	228
25	217,5	55	231

TABLA 107

Temperatura	°C	250
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	650
Carga inerte en el lecho	g	60
Carga húmeda añadida	g	5
Humedad del producto	%	9,47
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s
0	250	30
5	245	35
10	243	40
15	241,5	45
20	241,5	50
25	241,5	55
		Temperatura °C
		242,5
		243
		243
		243
		243
		244

TABLA 108

Temperatura	°C	250
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	650
Carga inerte en el lecho	g	60
Carga húmeda añadida	g	20
Humedad del producto	%	9,47
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s
0	250	30
5	230	35
10	225	40
15	224	45
20	224	50
25	225	55
		Temperatura °C
		226
		229
		230
		233
		234
		235

TABLA 109

Temperatura	°C	250
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	410
Carga inerte en el lecho	g	87
Carga húmeda añadida	g	5
Humedad del producto	%	16,64

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	250	30	240,5
5	243	35	241,5
10	240,5	40	242
15	239	45	242,5
20	239	50	243
25	240	55	244

TABLA 110

Temperatura		°C	250
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	410
Carga inerte en el lecho		g	87
Carga húmeda añadida		g	20
Humedad del producto		%	16,64
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	250	30	212
5	230	35	214
10	220	40	217
15	213	45	219
20	210	50	223
25	210	55	225

TABLA 111

Temperatura		°C	250
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	410
Carga inerte en el lecho		g	81
Carga húmeda añadida		g	5
Humedad del producto		%	12,21
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	250	30	239,5
5	243	35	240
10	242	40	241
15	241,5	45	242
20	239	50	242,5
25	239	55	242,5

TABLA 112

Temperatura		°C	250
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	410
Carga inerte en el lecho		g	81
Carga húmeda añadida		g	20
Humedad del producto		%	12,21
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	250	30	225
5	235	35	227
10	225	40	229,5
15	223	45	232
20	222	50	234
25	223,5	55	235,5

TABLA 113

Temperatura	°C	250	
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³	
Tamaño de partícula	μ	410	
Carga inerte en el lecho	g	58	
Carga húmeda añadida	g	5	
Humedad del producto	%	9,38	
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	250	30	245
5	247	35	245,5
10	245	40	245,5
15	244	45	246
20	244	50	246,5
25	244,5	55	247

TABLA 114

Temperatura	°C	250
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	410
Carga inerte en el lecho	g	58
Carga húmeda añadida	g	20
Humedad del producto	%	9,38

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	250	30	227
5	230	35	229,5
10	225	40	232
15	223	45	233
20	224	50	235
25	225,5	55	236,5

TABLA 115

Temperatura	°C	250
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	265
Carga inerte en el lecho	g	89
Carga húmeda añadida	g	5
Humedad del producto	%	17,77

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	250	30	236
5	243	35	236
10	238	40	237
15	237	45	237,5
20	235,5	50	238
25	235	55	238,5

TABLA 116

Temperatura	°C	250
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	265
Carga inerte en el lecho	g	89
Carga húmeda añadida	g	20
Humedad del producto	%	17,77

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	250	30	225
5	230	35	228
10	225	40	229
15	234	45	232
20	222	50	233,5
25	223	55	235

TABLA 117

Temperatura		°C	250
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	265
Carga inerte en el lecho		g	68
Carga húmeda añadida		g	5
Humedad del producto		%	11,10
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	250	30	234
5	230	35	235
10	229	40	236
15	230	45	237
20	231	50	238
25	233	55	239

TABLA 118

Temperatura		°C	250
Caudal de aire		m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula		μ	265
Carga inerte en el lecho		g	68
Carga húmeda añadida		g	20
Humedad del producto		%	11,10
Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	250	30	223
5	225	35	225
10	218	40	228
15	216	45	230
20	218	50	232
25	220	55	234

TABLA 119

Temperatura	°C	250
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	265
Carga inerte en el lecho	g	56
Carga húmeda añadida	g	5
Humedad del producto	%	8,63

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	250	30	242
5	245	35	242
10	243	40	242,5
15	242	45	243
20	241	50	243
25	241,5	55	243,5

TABLA 120

Temperatura	°C	250
Caudal de aire	m ³ /s	5,33·10 ⁻³
Tamaño de partícula	μ	265
Carga inerte en el lecho	g	56
Carga húmeda añadida	g	20
Humedad del producto	%	8,63

Tiempo s	Temperatura °C	Tiempo s	Temperatura °C
0	250	30	235
5	235	35	236
10	230	40	238
15	230,5	45	239
20	232	50	240
25	234	55	241

IV. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

IV.1. INTRODUCCION

El estudio crítico de los resultados experimentales obtenidos se presenta en este capítulo ordenándolos en dos grupos de experiencias. En primer lugar las correspondientes al transporte neumático y en segundo las realizadas en lecho fluidizado.

En ambos casos la interpretación de los resultados se ha efectuado utilizando métodos estadísticos, ya que dada la dificultad de la realización de las medidas, la dispersión de los resultados lo exige.

IV.2. EXPERIENCIAS EN TRANSPORTE NEUMATICO

Los valores de las velocidades medias que se presentan en las tablas 121 y 122, son el resultado de dividir la variación de humedad de las muestras por el tiempo de residencia obtenidos en las columnas de transporte neumático. A continuación y en las tablas 123 y 124 se muestran los citados valores de la velocidad, referidos a la humedad inicial del producto.

La dispersión de datos es lógica, si se tiene en cuenta que se superponen tres efectos completamente diferentes. Por una parte la alimentación del producto húmedo a la corriente de gas caliente, por otro lado la toma de muestra y

TABLA 121

Valores de las velocidades medias de secado en transporte neumático
a bajas temperaturas. ($\Delta H/\Delta \theta$)

	45°C			55°C			65°C		
	$Q_{\min.}$	$Q_{\text{inter.}}$	$Q_{\max.}$	$Q_{\min.}$	$Q_{\text{inter.}}$	$Q_{\max.}$	$Q_{\min.}$	$Q_{\text{inter.}}$	$Q_{\max.}$
H ₁	0,66	0,494	0,614	1,76	1,063	0,943	3,292	1,147	1,186
H ₂	0,215	0,478	1,0	0,88	0,926	0,128	1,080	1,331	1,064
H ₃	0,396	0,536	0,992	0,748	0,889	0,738	0,520	0,263	1,193

TABLA 122

Valores de las velocidades medias de secado en transporte neumático a altas temperaturas. ($\Delta H/\Delta \theta$)

		100°C		175°C		250°C	
		$Q_{\min.}$	$Q_{\max.}$	$Q_{\min.}$	$Q_{\max.}$	$Q_{\min.}$	$Q_{\max.}$
H_1	650 μ	1,610	3,319	0,822	0,857	1,385	2,295
	410	3,154	2,919	1,125	0,803	2,296	1,282
	265	3,400	2,080	2,090	1,786	2,795	0,521
H_2	650	1,410	2,808	0,855	1,428	0,769	0,410
	410	2,269	2,220	1,375	1,606	2,296	1,196
	265	2,440	1,030	2,630	2,500	2,473	2,083
H_3	650	0,990	1,550	0,592	0,857	1,038	0,492
	410	1,557	0,933	1,062	0,365	1,926	0,598
	265	1,500	0,270	1,360	0,357	0,537	0,625

TABLA 123

Valores de las velocidades relativas a la humedad inicial en transporte neumático
a bajas temperaturas ($\Delta H/H_0 \Delta \theta$)

	45°C			55°C			65°C		
	$Q_{\min.}$	$Q_{\text{inter.}}$	$Q_{\text{máx.}}$	$Q_{\min.}$	$Q_{\text{inter.}}$	$Q_{\text{máx.}}$	$Q_{\min.}$	$Q_{\text{inter.}}$	$Q_{\text{máx.}}$
H_1	0,064	0,0430	0,037	0,103	0,0861	0,060	0,222	0,0740	0,095
H_2	0,029	0,0504	0,068	0,081	0,102	0,085	0,190	0,143	0,122
H_3	0,084	0,0656	0,078	0,102	0,149	0,072	0,273	0,073	0,231

TABLA 124

Valores de las velocidades relativas a la humedad inicial en transporte neumático a altas temperaturas. ($\Delta H/H_0 \Delta \theta$)

		100°C		175°C		250°C	
		$Q_{\min.}$	$Q_{\max.}$	$Q_{\min.}$	$Q_{\max.}$	$Q_{\min.}$	$Q_{\max.}$
H_1	650 μ	0,095	0,196	0,055	0,057	0,078	0,136
	410	0,184	0,171	0,067	0,053	0,156	0,098
	265	0,257	0,122	0,096	0,092	0,155	0,031
H_2	650	0,099	0,198	0,075	0,107	0,055	0,035
	410	0,191	0,189	0,125	0,146	0,215	0,114
	265	0,265	0,106	0,25	0,203	0,209	0,172
H_3	650	0,097	0,151	0,053	0,081	0,108	0,0497
	410	0,177	0,112	0,125	0,043	0,224	0,072
	265	0,217	0,04	0,18	0,047	0,100	0,116

por último, la segregación del producto a lo largo de la columna, con la consiguiente distribución de tiempos de residencia.

La velocidad de secado expresada como $\Delta H/\Delta \theta$, proporciona un valor medio de la velocidad entre las condiciones iniciales y finales del tubo de transporte neumático. El valor de esta velocidad media está relacionado con los valores absolutos de las variables que se estudian, de tal forma que sus influencias pueden ser tales que el efecto global no sea de igual calidad en todos los casos.

La medida de los tiempos de residencia, de acuerdo con lo expuesto en la introducción, conduce a valores del orden de 0.5 a 10 segundos, y la observación del registro gráfico de alimentación y salida (figuras 35 y 36) presenta una dispersión amplia que obliga a admitir variaciones del orden de la mitad o del doble. Estos resultados están de acuerdo con la reducida información bibliográfica existente sobre el tema.

En esta situación, la ventaja del contraste estadístico de los resultados, frente al análisis directo, es doble. Por una parte, asegura los efectos de las variables estudiadas y por otra informa sobre el efecto relativo entre variablas, tanto en interacción como en calidad individual.

Además, cuando se comparen estos resultados con las velocidades obtenidas en lecho fluidizado, la utilización del mismo método estadístico en el contraste de resultados dará una mejor base a la comparación y estudio crítico de ambas series de experiencias.

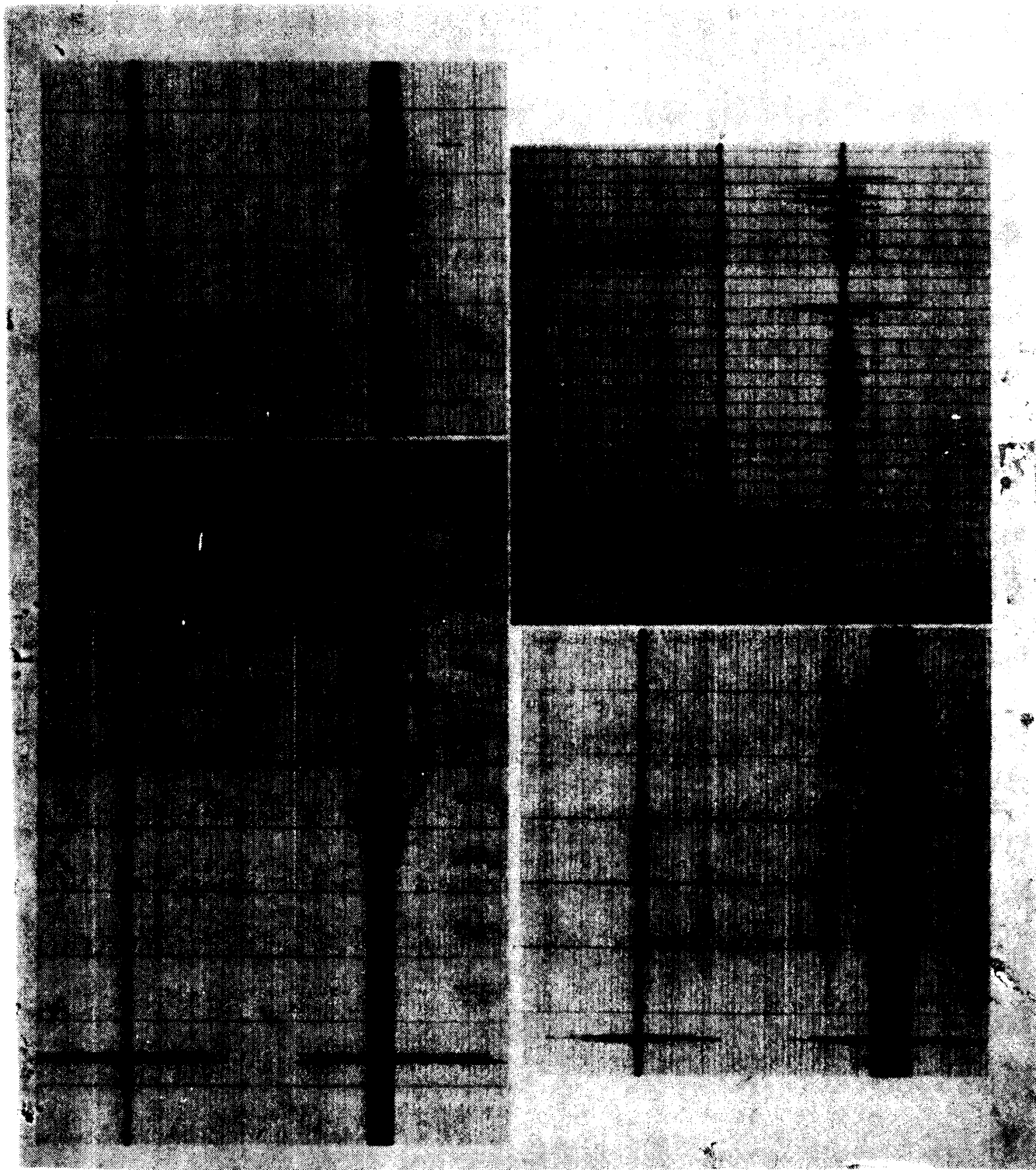


FIGURA 35

Registro gráfico de tiempos de residencia

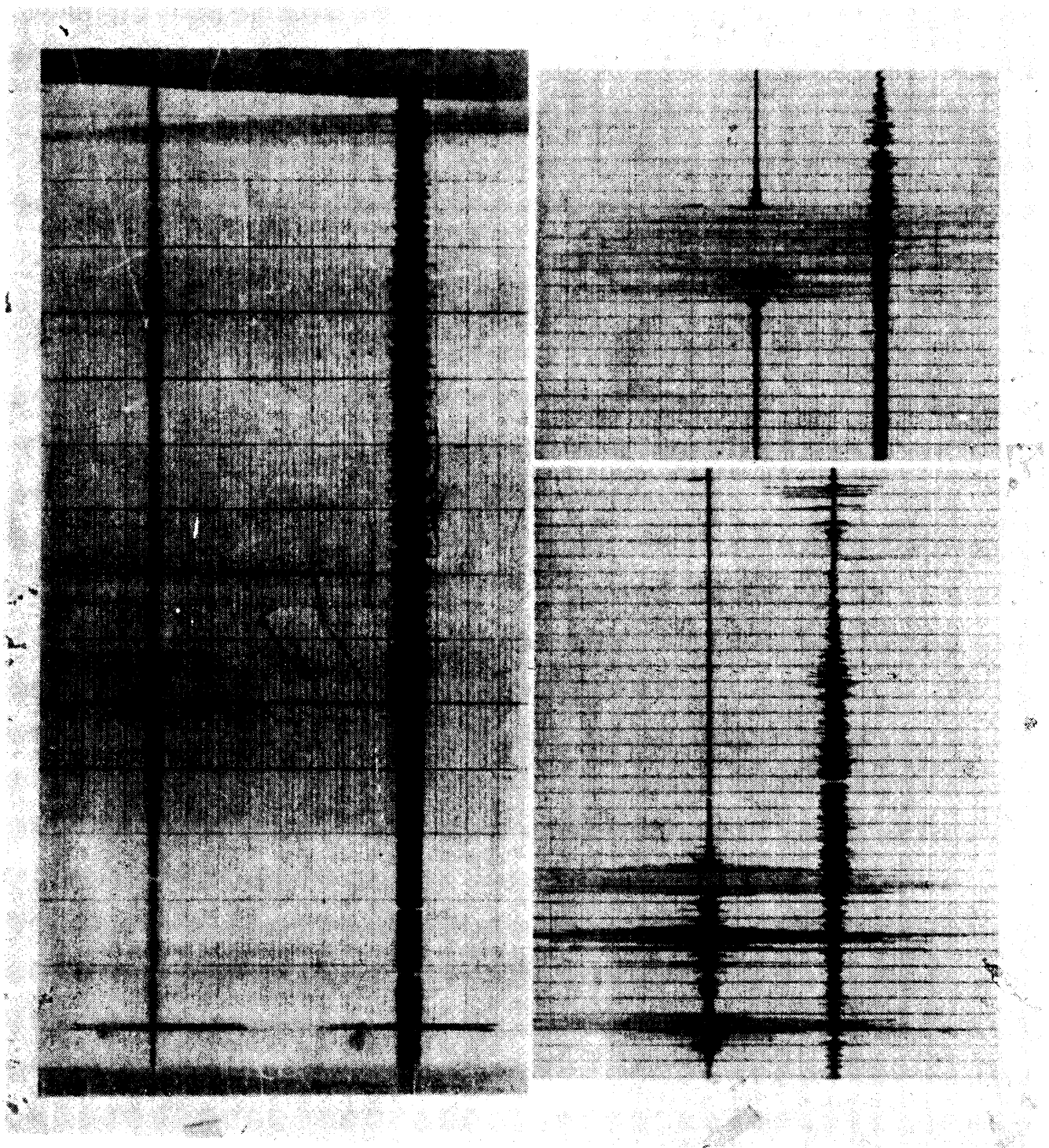


FIGURA 36

Registro gráfico de tiempos de residencia

IV.2.1. Método estadístico elegido para interpretar los resultados experimentales

Desde el punto de vista de análisis de influencia de variables existen varias posibilidades, tanto para el parámetro estimador de la influencia de la variable, como para el método de estimación.

El esfuerzo primario más importante es la selección de los dos puntos mencionados. Para el caso de este estudio, se ha elegido como método para hacer la estimación el contraste de la "F de Snedecor". En cuanto a la selección del parámetro estimador, sólo se está en condiciones de utilizar la velocidad de secado.

Tanto el procedimiento de tratamiento estadístico seleccionado como cualquier otro que se hubiera podido elegir, han de presentar la posibilidad de conocer la influencia de la interacción de variables. Este hecho complica los procedimientos de cálculo, con relación a los métodos en que sólo se tiene en cuenta la posible influencia de las variables aisladas. En la tabla 125 se muestra el procedimiento práctico de cálculo que se sigue para determinar los diferentes niveles de significación.

La ventaja más apreciable de este procedimiento de análisis es la posibilidad de observar interacciones significativas en las variables, concretamente de segundo y tercer orden, es decir, cada una de las variables con las otras y entre sí.

En las tablas 126 y 127 se recogen todas las definiciones de parámetros que se utilizan posteriormente para el cálculo, incluyendo los grados de libertad definidos a cada nivel de estimación.

La variable A se ha identificado con caudal, la B con temperatura y la C con tamaño de grano, los estudios abar-

TABLA 125

Procedimiento matemático para simplificar
el cálculo estadístico

$$\begin{aligned}
 SS_A &= \frac{1}{bcr} \sum_i \left[\left(\sum_j \sum_k \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] - \frac{1}{abcr} \left(\sum_i \sum_j \sum_k \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \\
 SS_B &= \frac{1}{acr} \sum_j \left[\left(\sum_i \sum_k \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] - \frac{1}{abcr} \left(\sum_i \sum_j \sum_k \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \\
 SS_C &= \frac{1}{abr} \sum_k \left[\left(\sum_i \sum_j \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] - \frac{1}{abcr} \left(\sum_i \sum_j \sum_k \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \\
 SS_{AB} &= \frac{1}{cr} \sum_i \sum_j \left[\left(\sum_k \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] - \frac{1}{bcr} \sum_i \left[\left(\sum_j \sum_k \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] \\
 &\quad - \frac{1}{acr} \sum_j \left[\left(\sum_i \sum_k \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] + \frac{1}{abcr} \left(\sum_i \sum_j \sum_k \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \\
 SS_{AC} &= \frac{1}{br} \sum_i \sum_k \left[\left(\sum_j \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] - \frac{1}{bcr} \sum_i \left[\left(\sum_j \sum_k \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] \\
 &\quad - \frac{1}{abr} \sum_k \left[\left(\sum_i \sum_j \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] + \frac{1}{abcr} \left(\sum_i \sum_j \sum_k \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \\
 SS_{BC} &= \frac{1}{ar} \sum_j \sum_k \left[\left(\sum_i \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] - \frac{1}{acr} \sum_j \left[\left(\sum_i \sum_k \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] \\
 &\quad - \frac{1}{abr} \sum_k \left[\left(\sum_i \sum_j \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] + \frac{1}{abcr} \left(\sum_i \sum_j \sum_k \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \\
 SS_{ABC} &= \frac{1}{r} \sum_i \sum_j \sum_k \left[\left(\sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] - \frac{1}{cr} \sum_i \sum_j \left[\left(\sum_k \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] \\
 &\quad - \frac{1}{br} \sum_i \sum_k \left[\left(\sum_j \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] - \frac{1}{ar} \sum_j \sum_k \left[\left(\sum_i \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] \\
 &\quad + \frac{1}{bcr} \sum_i \left[\left(\sum_j \sum_k \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] + \frac{1}{acr} \sum_j \left[\left(\sum_i \sum_k \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] \\
 &\quad + \frac{1}{abr} \sum_k \left[\left(\sum_i \sum_j \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \right] - \frac{1}{abcr} \left(\sum_i \sum_j \sum_k \sum_m y_{ijkm} \right)^2 \\
 SS_E &= SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} - SS_{ABC} \\
 SS_T &= \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m y_{ijkm}^2 - \frac{\left(\sum_i \sum_j \sum_k \sum_m y_{ijkm} \right)^2}{abcr}
 \end{aligned}$$

TABLA 126

Método estadístico para el caso de cálculo con tres variables y sus interacciones

	SS	d.f.	MS	E[MS]
A	$SS_A = bc \sum_i (y_{i...} - \bar{y}_{...})^2$	$a - 1$	$\frac{SS_A}{a - 1}$	$\sigma^2 + bc \sum_i \frac{\alpha_i^2}{a - 1}$
B	$SS_B = ac \sum_j (y_{.j.} - \bar{y}_{...})^2$	$b - 1$	$\frac{SS_B}{b - 1}$	$\sigma^2 + ac \sum_j \frac{\beta_j^2}{b - 1}$
C	$SS_C = ab \sum_k (y_{..k} - \bar{y}_{...})^2$	$c - 1$	$\frac{SS_C}{c - 1}$	$\sigma^2 + ab \sum_k \frac{\gamma_k^2}{c - 1}$
AB	$SS_{AB} = c \sum_i \sum_j (y_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2$	$(a - 1)(b - 1)$	$\frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$\sigma^2 + rc \sum_i \sum_j \frac{\delta_{ij}^2}{(a - 1)(b - 1)}$
AC	$SS_{AC} = b \sum_i \sum_k (y_{ik.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.k.} + \bar{y}_{...})^2$	$(a - 1)(c - 1)$	$\frac{SS_{AC}}{(a - 1)(c - 1)}$	$\sigma^2 + rb \sum_i \sum_k \frac{\delta_{ik}^2}{(a - 1)(c - 1)}$
BC	$SS_{BC} = a \sum_j \sum_k (y_{.jk} - \bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{..k} + \bar{y}_{...})^2$	$(b - 1)(c - 1)$	$\frac{SS_{BC}}{(b - 1)(c - 1)}$	$\sigma^2 + ra \sum_j \sum_k \frac{\delta_{jk}^2}{(b - 1)(c - 1)}$
ABC	$SS_{ABC} = r \sum_i \sum_j \sum_k (y_{ijk} - \bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i.k} - \bar{y}_{.jk} + \bar{y}_{i..} + \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{..k} - \bar{y}_{...})^2$	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	$\frac{SS_{ABC}}{(a - 1)(b - 1)(c - 1)}$	$\sigma^2 + r \sum_i \sum_j \sum_k \frac{\delta_{ijk}^2}{(a - 1)(b - 1)(c - 1)}$
Error	$SS_E = \sum_i \sum_j \sum_k (y_{ijk} - \bar{y}_{ijk})^2$	$abc(r - 1)$	$\frac{SS_E}{abc(r - 1)}$	σ^2
Total	$SS_T = \sum_i \sum_j \sum_k (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2$	$abc - 1$		

TABLA 127

Definición de los parámetros estadísticos

A,B,C	Variables estudiadas.
		Temperatura
		Caudal
		Tamaño de partículas.
a,b,c	Niveles experimentados de cada variable
		45, 55, 65, 100, 175 y 250°C
		Caudal mínimo, medio y máximo.
		Sin clasificar, 650, 410 y 265 micras.
r	Número de veces que se ha realizado un experimento en cada una de las condiciones posibles.
		Estudio preliminar 1
		Estudio definitivo 3

can las influencias a 100, 175 y 250°C de 2 caudales y tres tamaños de partícula. También se considera el caso de influencia del caudal con tres niveles y la temperatura a 45, 55 y 65°C con un solo tamaño de grano. En cada uno de los casos se ha utilizado un coeficiente de experimentos $r = 3$, correspondiente a cada una de las humedades de entrada, y se ha de tener en cuenta que cada uno de éstos es la media aritmética de 5 a 8 experimentos individuales.

También y como se observa en las tablas 128 a 131, que se acompañan más adelante, el estudio de contraste se ha hecho para dos parámetros estimadores. Uno es la velocidad media de secado, definida como el salto de humedad dividido por el tiempo de residencia correspondiente al tubo de transporte. El segundo estimador es una velocidad relativa referida en todos los casos a la humedad inicial.

Con objeto de unificar el criterio operativo, todo el cálculo matemático se ha realizado con ordenador, ajustándose al programa "ANALYSIS OF VARIANCE", IBM-360 ANOVA.

IV.2.2. Niveles de significación. Interpretación

Los valores obtenidos están en las tablas 128 a 131, de ellos solamente se analizan los correspondientes a la influencia en el estimador $\frac{H_0 - H}{H_0} / \theta$. La razón de esta selección está motivada por el hecho de que el estimador mencionado se muestra más sensible que $H_0 - H / \theta$ y además, se utiliza un valor adimensional en el numerador que tiene más fácil comparación con el correspondiente que se obtenga para el caso de secado en lecho fluidizado. Por otra parte, evita una definición rigurosa de la humedad, siempre y cuando se manejen las mismas unidades.

Para simplificar la notación e identificación de variables el caudal se identifica con las siglas CA, temperatura con TE, tamaño con TA y humedad con HU.

TABLA 128

Niveles de significacion del efecto de las variables sobre la velocidad de secado
a bajas temperaturas

VARIABLE	GRADO DE SIGNIFICACION			GRADO DE SIGNIFICACION		
	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION
CA	2.8	1,11	NO	2.18	0,50	NO
TE	2.8	5,88	95	2.18	2,63	NO
CA-TE	4.8	2,00	NO	4.18	0,90	NO
HU	2.8	4,96	95	----	----	--
CA-HU	4.8	3,35	NO	----	----	--
TE-HU	4.8	2,19	NO	----	----	--

TABLA 129

Niveles de significacion del efecto de las variables sobre la velocidad
de secado a altas temperaturas

VARIABLE	GRADOS DE LIBERTAD			GRADO DE SIGNIFICACION		
	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION
CA	1.8	6,27	95	1.36	2,42	NO
TE	2.8	12,11	99,5	2.36	4,67	97,5
CA-TE	2.8	1,91	NO	2.36	0,73	NO
TA	2.8	3,46	NO	2.36	1,33	NO
CA-TA	2.8	11,04	99,5	2.36	4,25	97,5
TE-TA	4.8	3,01	NO	4.36	1,16	NO
CA-TE-TA	4.8	1,92	NO	4.36	0,74	NO
HU	2.8	23,87	99,9	----	----	----
CA-HU	2.8	0,69	NO	----	----	----
TE-HU	4.8	3,3	NO	----	----	----
CA-TE-HU	4.8	0,36	NO	----	----	----
TA-HU	4.8	2,03	NO	----	----	----
CA-TA-HU	4.8	0,94	NO	----	----	----
TE-TA-HU	8.8	1,2	NO	----	----	----

TABLA 130

Niveles de significacion de la influencia de las variables sobre la velocidad de secado relativa a la humedad inicial, en el caso de bajas temperaturas

VARIABLE	GRADOS DE LIBERTAD			GRADO DE SIGNIFICACION		
	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION
CA	2.8	3,54	NO	2.18	3,28	NO
TE	2.8	20,04	99,9	2.18	18,57	99,9
CA-TE	4.8	4,4	95	4.18	4,08	97,5
HU	2.8	3,06	NO	-----	-----	-----
CA-HU	4.8	1,04	NO	-----	-----	-----
TE-HU	4.8	0,28	NO	-----	-----	-----

TABLA 131

Niveles de significacion de la influencia de las variables sobre la velocidad de secado relativa a la humedad inicial, en el caso de altas temperaturas

VARIABLE	GRADOS DE LIBERTAD			F	GRADO DE SIGNIFICACION	
	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION
CA	1.8	11,37	99	1.36	8,73	99
TE	2.8	9,95	99	2.36	7,64	99,5
CA-TE	2.8	0,73	NO	2.36	0,56	NO
TA	2.8	8,75	99	2.36	7,27	99,5
CA-TA	2.8	11,43	99,5	2.36	8,77	99,9
TE-TA	4.8	1,58	NO	4.36	1,21	NO
CA-TE-TA	4.8	3,42	NO	4.36	2,63	NO
HU	2.8	6,16	97,5	----	----	----
CA-HU	2.8	1,64	NO	----	----	----
TE-HU	4.8	1,87	NO	----	----	----
CA-TE-HU	4.8	0,17	NO	----	----	----
TA-HU	4.8	2,23	NO	----	----	----
CA-TA-HU	4.8	0,31	NO	----	----	----
TE-TA-HU	8.8	0,61	NO	----	----	----

La correspondencia de influencias es la misma para el caso de los dos estimadores. No aparece ningún caso en el que una variable muestra su influencia en el estimador $H_0 - H/\theta$, que no tenga su reproducción en $\frac{H_0 - H}{H_0}/\theta$, sin embargo, como ya se ha dicho, este estimador aparece más sensible.

La mayor capacidad de apreciación es lógica si se tiene en cuenta que bajo estas bases, se establece el salto de humedad respecto a la misma referencia en todos los casos.

Tal y como se aprecia en la primera parte de las tablas 128 a 131 que corresponden al estudio que se hace teniendo en cuenta la posible influencia de la humedad, ninguno de los efectos dobles o triples en los que está la humedad inicial aparece significativo, por lo que se puede deducir que la influencia de este factor no es muy grande.

Para poder desentrañar más aún el problema se puede recurrir al estudio de las medias obtenidas a tres valores de humedades, y la desviación estandar de las mencionadas medias.

NIVEL DE HUMEDAD	VALOR DE LA MEDIA	DESVIACION ESTANDAR
ALTO	0,1229	$\pm 0,0564$
MEDIO	0,153	$\pm 0,0667$
BAJO	0,1194	$\pm 0,058$

Como se aprecia en este caso, los valores absolutos de las medias son diferentes y esta es la razón por la que el estudio estadístico indica la posibilidad de una cierta influencia de este factor. Sin embargo, el análisis con criterio científico muestra tres aspectos de capital interés

que hacen rechazar de plano la influencia del factor humedad inicial y considerar que su aparición con un cierto nivel de significación es debido a la dispersión de los datos obtenidos.

Estos tres aspectos son los siguientes:

1°) No se llega a concluir, ni aún acudiendo a los desarrollos más especiales, que pueda existir un punto singular a una humedad intermedia, que hasta que se alcance muestre una velocidad de secado creciente y una vez sobrepasada la velocidad comience a decrecer.

2°) La observación o la representación del valor de la media junto con el posible intervalo de variación debido a la desviación estandar de que está afectada, permite ver que las amplitudes de variación son prácticamente las mismas y que los valores máximos y mínimos coinciden, por tanto no hay razón para suponer que las ligeras desviaciones que se pueden tener en los valores de las medias sean significativas.

3°) En el caso de considerar la velocidad expresada como $\Delta H / \Delta \theta$, se aprecia que el efecto de la humedad es constante a humedades altas y medias ($14 \approx 7\%$) y que la velocidad disminuye en el rango de humedades más bajas. Este hecho puede estar motivado porque en el intervalo de humedades entre 5 y 3% el producto llegaba a la cabeza del secadero con humedad prácticamente cero. Puede ocurrir que al utilizarse a humedades más altas, valores del tiempo de residencia semejantes, se tengan algunos valores afectados del error experimental y sean más bajos que los reales que se habrían obtenido si se hubiese podido tomar la muestra con una humedad entre el 1 y el 3%.

Aceptando estas bases, que lógicamente sólo se cumplen teniendo en cuenta que en el intervalo de humedades considerado el agua está en la superficie del producto, se trasla-

da el estudio a un problema de tres variables con tres ensayos individuales para cada combinación posible de las variables.

Los niveles de significación que se obtienen al globalizar como base de referencia todos los estados individuales en los que aparecía la variable humedad oscilan entre 99 y 99,9%, que se pueden considerar como aceptablemente significativos.

En el apartado próximo se estudiará la influencia y peculiaridades características de cada variable, pero ahora se indica que cuando se observan los valores individuales de las velocidades medias se ven algunas desviaciones muy apreciables sin justificación lógica. El tratamiento estadístico utilizado hasta ahora, ha tomado todos los valores experimentales tal cual se obtuvieron, pero lógicamente existe la posibilidad de introducir ligeras modificaciones basadas en que no hay criterio conocido para interpretar algunas desviaciones que como ya se indica son excesivamente grandes. Por otra parte, al disponerse de otros dos valores, la media de los mismos se puede suponer razonablemente dentro del valor que debería obtenerse si en el experimento no hubieran coincidido una serie de anomalías.

Operando de esta forma se alcanzan mayores niveles de precisión en el valor de la significación de las variables, como se muestra en las tablas 132 a 137 que se han obtenido promediando un tercer valor entre los dos pertenecientes a sus mismas condiciones. La variación realizada afecta al 5,5% del total de valores obtenidos experimentalmente.

Este artificio queda plenamente justificado por el tratamiento que "a posteriori" han de recibir los valores de la velocidad. Es decir, la homogeneidad del número de observaciones para cada posible combinación de las variables, ha de ser total si se hace un estudio global de los datos como en este caso.

TABLA 132

Valores de las velocidades medias de secado a bajas temperaturas.
(Valores promediados: 4)

	45°C			55°C			65°C		
	$Q_{\min.}$	$Q_{\text{inter.}}$	$Q_{\max.}$	$Q_{\min.}$	$Q_{\text{inter.}}$	$Q_{\max.}$	$Q_{\min.}$	$Q_{\text{inter.}}$	$Q_{\max.}$
H_1	0,660	0,494	0,614	0,810	1,063	0,943	0,80	1,147	1,186
H_2	0,215	0,478	1,0	0,880	0,926	0,840	1,080	1,331	1,064
H_3	0,396	0,536	0,992	0,748	0,889	0,738	0,520	1,233	1,193

TABLA 133

Valores de las velocidades medias de secado a altas temperaturas. (Valores promediados: 1)

		100°C		175°C		250°C	
		$Q_{\min.}$	$Q_{\max.}$	$Q_{\min.}$	$Q_{\max.}$	$Q_{\min.}$	$Q_{\max.}$
H_1	650 μ	1,61	3,319	0,822	0,857	1,385	2,295
	410	3,154	2,91	1,125	0,803	2,296	1,282
	265	3,4	2,08	2,09	1,786	2,795	0,521
H_2	650	1,41	2,808	0,855	1,428	0,769	0,41
	410	2,269	2,22	1,375	1,606	2,296	1,196
	265	2,44	1,03	2,63	2,5	2,473	2,083
H_3	650	0,99	1,55	0,592	0,857	1,038	0,492
	410	1,557	0,933	1,062	0,365	1,926	0,598
	265	1,5	1,55	1,36	0,357	0,537	0,625

TABLA 134

Valores de las velocidades relativas de secado a
altas temperaturas. (Valores promediados: 3)

		100°C		175°C		250°C	
		$Q_{\min.}$	$Q_{\max.}$	$Q_{\min.}$	$Q_{\max.}$	$Q_{\min.}$	$Q_{\max.}$
H_1	650 μ	0,095	0,196	0,055	0,057	0,078	0,136
	410	0,184	0,171	0,067	0,053	0,156	0,098
	265	0,257	0,122	0,096	0,092	0,155	0,144
H_2	650	0,099	0,198	0,075	0,107	0,055	0,035
	410	0,191	0,189	0,125	0,146	0,215	0,114
	265	0,265	0,106	0,25	0,203	0,209	0,172
H_3	650	0,097	0,151	0,053	0,081	0,108	0,497
	410	0,177	0,112	0,125	0,043	0,224	0,072
	265	0,217	0,114	0,18	0,047	0,182	0,116

TABLA 135

Niveles de significacion del efecto de las variables sobre las velocidades de secado a bajas temperaturas. (Referidos a los valores de la tabla 132)

VARIABLE	GRADOS DE LIBERTAD			GRADO DE SIGNIFICACION		
	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION
CA	2.8	5,38	95	2.18	7,94	97,5
TE	2.8	13,82	99,5	2.18	20,40	99,5
CA-TE	4.8	2,23	NO	4.18	3,29	NO
HU	2.8	0,3	NO	----	----	----
CA-HU	4.8	0,41	NO	----	----	----
TE-HU	4.8	0,50	NO	----	----	----

TABLA 136

Niveles de significacion del efecto de las variables sobre las velocidades de secado a altas temperaturas. (Referidos a los valores de la tabla 133)

VARIABLE	GRADOS DE LIBERTAD			F	GRADO DE SIGNIFICACION	
	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION			
CA	1.8	3,90	NO	1.36	1,85	NO
TE	2.8	12,73	99,5	2.36	6,04	97,5
CA-TE	2.8	2,22	NO	2.36	1,05	NO
TA	2.8	3,89	NO	2.36	1,84	NO
CA-TA	2.8	8,16	97,5	2.36	3,87	NO
TE-TA	4.8	1,84	NO	4.36	0,87	NO
CA-TE-TA	4.8	1,00	NO	4.36	0,47	NO
HU	2.8	1,75	NO	----	----	----
CA-HU	2.8	0,24	NO	----	----	----
TE-HU	4.8	2,40	NO	----	----	----
CA-TE-HU	4.8	0,28	NO	----	----	----
TA-HU	4,8	1,09	NO	----	----	----
CA-TA-HU	4,8	1,38	NO	----	----	----
TE-TA-HU	8,8	1,45	NO	----	----	----

TABLA 137

Niveles de significación del efecto de las variables sobre la velocidad de secado relativa a la humedad inicial y a altas temperaturas. (Referidos a los valores de la tabla 134)

VARIABLE	GRADOS DE LIBERTAD			F	GRADO DE SIGNIFICACION	
	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION		GRADOS DE LIBERTAD	F
CA	1.8	21,39	99,5	1.36	9,032	99,5
TE	2.8	25,45	99,9	2.36	10,746	99,9
CA-TE	2.8	1,59	NO	2.36	0,67	NO
TA	2.8	31,45	99,9	2.36	13,88	99,9
CA-TA	2.8	23,06	99,9	2.36	9,73	99,9
TE-TA	4.8	2,6	NO	4.36	1,1	NO
CA-TE-TA	4.8	6,88	97,5	4.36	2,9	95,0
HU	2.8	9,49	99,0	----	----	----
CA-HU	2.8	5,78	95,0	----	----	----
TE-HU	4.8	4,93	95,0	----	----	----
CA-TE-HU	4.8	0,97	NO	----	----	----
TA-HU	4.8	3,0	NO	----	----	----
CA-TA-HU	4.8	0,47	NO	----	----	----
TE-TA-HU	8.8	1,15	NO	----	----	----

Es de destacar el hecho de que al utilizar este artificio, lo único que ha mostrado es una mayor precisión para los niveles de influencia, pero en ningún caso han aparecido nuevas significaciones que no estuvieran en el tratamiento de los datos originales.

IV.2.3. Influencia de las variables estudiadas

Las variables estudiadas, y que en principio se supone que pueden influir sobre la velocidad de secado, son las siguientes:

- 1) Caudal.
- 2) Temperatura.
- 3) Tamaño de partícula.
- 4) Humedad inicial.

Los niveles entre los que han oscilado las variables y sus valores son los siguientes:

1) Caudal.

- 1.a) Máximo. $5,84 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sg}$
- 1.b) Medio. $4,83 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sg}$
- 1.c) Mínimo. $3,47 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sg}$

2) Temperatura.

2.a) Altas.

- 2.a.1) 250°C
- 2.a.2) 175°C
- 2.a.3) 100°C

2.b) Bajas

- 2.b.1) 65°C
- 2.b.2) 55°C
- 2.b.3) 45°C

3) Tamaño de partícula.

3.a) Sin clasificar.

3.a.1) Inferiores a 1 mm.

3.b) Clasificados.

3.b.1) 0,65 mm.

3.b.2) 0,41 mm.

3.b.3) 0,265 mm.

4) Humedad inicial. (Entre el 17 y el 4%).

IV.2.3.1. *Influencia del caudal de aire utilizado para el transporte neumático sobre la velocidad de secado*

Hay que comenzar por señalar el hecho de que este factor tiene un límite inferior fijado porque cuando menos, se ha de tener un flujo capaz de producir el arrastre mecánico de las partículas. Este punto se ha mostrado de interés cuando se trabaja con partículas que no tienen una buena clasificación de tamaño, ya que en algunos casos puede tenerse una especie de fluidización a lo largo de la columna con la consiguiente distorsión en los tiempos de residencia.

Cuando ya se ha definido un flujo claro de transporte se aumenta este caudal en el grado elegido. A primera vista un aumento del caudal debe llevar aparejadas las siguientes consecuencias:

- a) Disminución del tiempo de residencia de las partículas en el secadero.
- b) Aumento de la turbulencia.
- c) Mayor capacidad de alimentación de sólido.
- d) Mejores coeficientes de transferencia, como consecuencia del aumento de turbulencia.

De acuerdo con la tabla 130 operando en el intervalo de temperaturas entre 45 a 65°C, el caudal NO es una variable que afecta a la velocidad de secado.

Este hecho se interpreta teniendo en cuenta que hay un punto umbral de turbulencia, por encima del cual las variaciones no afectan a la velocidad de secado y fundamentalmente porque la transferencia está controlada por el gradiente de temperatura. El no efecto que se tiene, a pesar de la variación en el tiempo de residencia, se comprende bien, si se tiene en cuenta que al tratarse de partículas inferiores a 1 mm, pero sin clasificar, la segregación que se produce en el secadero hace que entre la llegada de las primeras partículas y las últimas al punto de toma de muestra haya transcurrido un tiempo del orden o mayor que el tiempo total de residencia en el secadero, con lo que este factor no debe presentar, y de hecho no presenta, ninguna influencia.

En el caso de elevadas temperaturas, en el rango entre 100 y 250°C, el caudal es un factor que aparentemente sí afecta la velocidad de secado.

La influencia relativa se recoge en las tablas 138 y 139 en las que se observa que la velocidad disminuye al aumentar el caudal, este hecho se cumple rigurosamente a las temperaturas ensayadas y también para los dos tamaños de grano más pequeños. Para el tamaño mayor no se observa influencia debido seguramente a la segregación efectiva que se produce durante el transporte.

Teniendo en cuenta que la operación se realiza en fase diluida, no parece haber ninguna razón clara que justifique que un aumento de caudal disminuya la velocidad de secado, excepto e igual que ya se señalaba anteriormente, la disminución de tiempo de residencia que acompaña a un aumento de caudal.

TABLA 138

Variación de la velocidad de secado con el caudal de aire

(La velocidad disminuye al aumentar el caudal para los tamaños más pequeños, para el tamaño más grande permanece prácticamente constante debido a la segregación en el lecho).

INFLUENCIA DEL TAMAÑO

TOTAL A 650, 410 y 265 μ

- $Q_{\text{máx.}} 0,115 \pm 0,0512$

- $Q_{\text{mín.}} 0,148 \pm 0,0671$

PARCIAL A 650 μ

- $Q_{\text{máx.}} 0,112 \pm 0,0616$

- $Q_{\text{mín.}} 0,079 \pm 0,0214$

PARCIAL A 410 μ

- $Q_{\text{máx.}} 0,111 \pm 0,0506$

- $Q_{\text{mín.}} 0,162 \pm 0,0500$

PARCIAL A 265 μ

- $Q_{\text{máx.}} 0,124 \pm 0,0452$

- $Q_{\text{mín.}} 0,201 \pm 0,0546$

TABLA 139

Variación de la velocidad de secado con el caudal de aire

(La velocidad de secado disminuye a medida que aumenta el caudal, y se cumple rigurosamente a todas las temperaturas)

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

TOTAL A 100, 175 y 250°C

- $Q_{\text{máx.}} \ 0,115 \pm 0,0512$

- $Q_{\text{mfn.}} \ 0,148 \pm 0,0671$

PARCIAL A 100°C

- $Q_{\text{máx.}} \ 0,151 \pm 0,0384$

- $Q_{\text{mfn.}} \ 0,175 \pm 0,0663$

PARCIAL A 175°C

- $Q_{\text{máx.}} \ 0,092 \pm 0,0530$

- $Q_{\text{mfn.}} \ 0,114 \pm 0,0655$

PARCIAL A 250°C

- $Q_{\text{máx.}} \ 0,107 \pm 0,0470$

- $Q_{\text{mfn.}} \ 0,153 \pm 0,0613$

IV.2.3.2. *Influencia de la temperatura del aire empleado para secado y transporte sobre la velocidad de secado*

Debido a las especiales características del secado en transporte neumático, se han elegido dos bandas de temperatura ampliamente separadas y con influencias lógicamente diferentes, una banda baja 45, 55 y 65°C y una banda alta que alcanza hasta los 250°C.

La posibilidad de que la temperatura sea un factor que afecte a la velocidad de secado, tanto a bajas como a altas temperaturas, aparece claramente establecida en ambos casos. Los niveles de significación son en las dos bandas superiores al 99.5%.

El resultado de las experimentaciones realizadas marca un aumento de la velocidad de secado con la temperatura para el caso de bajas temperaturas. Este hecho se comprende bien si se tiene en cuenta que al aumentar el gradiente térmico debe verse favorecida la transferencia. Por otro lado a bajas temperaturas parece lógico que el efecto de la temperatura sea notorio y así se cumple rigurosamente para todos los casos, es decir, en los tres valores de caudal ensayados, tal como muestra la tabla 140.

En cualquier caso un salto de 20°C en este intervalo de temperaturas, tiene un efecto máximo estimable de doblar o a lo sumo triplicar la velocidad de secado.

Merece especial atención al estudio concerniente a la variación de la velocidad de secado a altas temperaturas (banda entre 100 y 250°C). De acuerdo con lo mencionado en párrafos anteriores, el estudio estadístico prueba que la variable temperatura tiene una influencia significativa sobre la velocidad de secado con una probabilidad mayor del 99.5%.

TABLA 140

Variación de la velocidad de secado con la temperatura
(La velocidad de secado aumenta al aumentar la temperatura)

INFLUENCIA DEL CAUDAL

TOTAL A $Q_{\text{máx.}}$, $Q_{\text{inter.}}$, $Q_{\text{min.}}$

45°C	0,0576 \pm 0,0188
55°C	0,0934 \pm 0,0256
65°C	0,1580 \pm 0,0736

PARCIAL A $Q_{\text{máx.}}$

45°C	0,0610 \pm 0,2130
55°C	0,0723 \pm 0,1250
65°C	0,1490 \pm 0,0720

PARCIAL A $Q_{\text{inter.}}$

45°C	0,0530 \pm 0,0115
55°C	0,1127 \pm 0,0330
65°C	0,0969 \pm 0,0402

PARCIAL A $Q_{\text{min.}}$

45°C	0,0590 \pm 0,0278
55°C	0,0950 \pm 0,0124
65°C	0,2280 \pm 0,0418

Parecería lógico pensar que al aumentar la temperatura debería aumentar la velocidad de secado y, sin embargo, los resultados experimentales indican que la velocidad de secado disminuye al pasar del nivel 100°C a cualquiera de los otros dos 175 y 250°C. Este hecho que aparentemente no tiene una explicación clara en la propia influencia de la temperatura, sí la tiene en los factores a que afecta la mencionada temperatura, principalmente la velocidad lineal del agente de secado y a la vez gas portador dentro del tubo de transporte.

Los valores medios de la velocidad de secado para las distintas temperaturas a los distintos tamaños de grano y caudales se recogen en las tablas 141 y 142. En las que se observa cómo en todos los casos de caudal y tamaños estudiados se cumple que la velocidad de secado disminuye al pasar del nivel 100°C a los 175 y 250 respectivamente.

La interacción de la temperatura se puede justificar por su influencia sobre el tiempo de residencia. Durante la experimentación se han mantenido constantes dos niveles de caudal másico. Pero al aumentarse la temperatura lógicamente el caudal volumétrico aumenta y este aumento para una sección constante del secadero, representa un aumento de la velocidad lineal del gas. Como la velocidad de arrastre y, por tanto, el tiempo de residencia del sólido en el secadero son función de la velocidad lineal del gas, al aumentar ésta por efecto de la temperatura se está disminuyendo el tiempo de residencia.

IV.2.3.3. *Influencia del tamaño de las partículas*

El comportamiento de este factor se ajusta mucho mejor a las teorías que en este sentido hay formuladas que el de los mencionados anteriormente.

TABLA 141

Variación de la velocidad de secado con la temperatura
(La velocidad de secado disminuye al aumentar la temperatura, pero no de 175 a 250°C y se cumple en todos los casos)

INFLUENCIA DEL CAUDAL

TOTAL A $Q_{\text{máx.}}$ y $Q_{\text{min.}}$

100°C	0,1630 \pm 0,0541
175°C	0,1030 \pm 0,0590
250°C	0,1280 \pm 0,0580

PARCIAL A $Q_{\text{min.}}$

100°C	0,1750 \pm 0,0663
175°C	0,1140 \pm 0,0655
250°C	0,1530 \pm 0,0613

PARCIAL A $Q_{\text{máx.}}$

100°C	0,1510 \pm 0,0384
175°C	0,0921 \pm 0,0530
250°C	0,1070 \pm 0,4700

TABLA 142

Variación de la velocidad de secado con la temperatura
 (La velocidad de secado disminuye al aumentar la temperatura, pero no de 175 a 250°C y se cumple en todos los casos)

INFLUENCIA DEL TAMAÑO

TOTAL A 650, 410 y 265 μ

100°C	0,1630 \pm 0,0541
175°C	0,1030 \pm 0,0590
250°C	0,1230 \pm 0,0580

PARCIAL A 650 μ

100°C	0,1393 \pm 0,0493
175°C	0,0713 \pm 0,0209
250°C	0,0769 \pm 0,0385

PARCIAL A 410 μ

100°C	0,1700 \pm 0,0297
175°C	0,0932 \pm 0,0439
250°C	0,1460 \pm 0,0628

PARCIAL A 265 μ

100°C	0,1800 \pm 0,0700
175°C	0,1070 \pm 0,0710
250°C	0,1630 \pm 0,0320

Si se acepta que la cantidad de sólido alimentado al secadero es prácticamente constante, la cantidad total de área de partículas que se secan será tanto mayor, cuanto más pequeñas sean las partículas. El aumento del área de secado es uno de los factores que se conocen desde antiguo como elevadores de la velocidad de secado.

En definitiva en las dos "propiedades" que se transfieren, calor del aire a la partícula y materia de la partícula al aire, el área de transferencia es directamente proporcional a la cantidad transferida, y si lo referimos a la unidad de tiempo a la velocidad de transferencia.

En el caso de transporte neumático se cumple rigurosamente que la velocidad de secado aumenta al disminuir el tamaño de las partículas que se secan (tablas 143 y 144), y este hecho se cumple a todas las temperaturas y a los dos caudales ensayados, aunque el efecto es más notorio cuando se opera con velocidades moderadas del gas portador. Lógicamente cuanto mayor es el caudal y consiguientemente la velocidad lineal del gas, menores son los tiempos de residencia y, por tanto, más difícil es apreciar el efecto de otros factores. Este fenómeno se pone de manifiesto observando la tabla 143, en la que de nuevo se aprecia la gran influencia de los tiempos de residencia, sobre la obtención de resultados dispersos en los que es muy difícil discernir el efecto de otras variables.

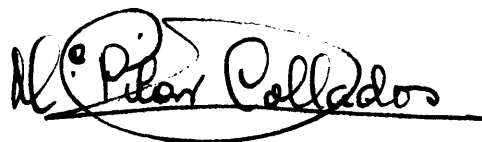
TABLA 143

Variación de la velocidad de secado con el tamaño de grano
(La velocidad aumenta a medida que se disminuye el tamaño
y se cumple a los dos caudales, siendo más notorio
a caudal bajo)

INFLUENCIA DEL CAUDAL		
TOTAL A $Q_{\text{máx.}}$ y $Q_{\text{mín.}}$		
650 μ	0,0958	\pm 0,0478
410 μ	0,1360	\pm 0,0556
265 μ	0,1620	\pm 0,0628
PARCIAL A $Q_{\text{máx.}}$		
650 μ	0,1120	\pm 0,0616
410 μ	0,1110	\pm 0,0507
265 μ	0,1240	\pm 0,0452
PARCIAL A $Q_{\text{mín.}}$		
650 μ	0,0794	\pm 0,0214
410 μ	0,1620	\pm 0,0500
265 μ	0,2010	\pm 0,0546

de dimetilglioxima, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- a) La estequiometría de la reacción: $\text{Cu}^{2+} + n \text{H}_2\text{Dm} \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{HDm})_n + n \text{H}^+$
que resulta de la representación de $\log \left(\frac{[\text{Cu}(\text{HDm})_n]^{2-n}}{[\text{Cu}^{2+}]} \right) + 1$
frente al pH. En efecto, los datos experimentales se ajustaron bien a una
recta de pendiente $n = 2$.
- b) La constante de equilibrio de la reacción de formación del complejo
 $\text{Cu}(\text{HDm})_2$ a partir del Cu^{2+} y dimetilglioxima ($K_e = (1,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-2}$).
- c) A partir de la constante anterior y la de ionización de la dimetilglioxima, se calculó la constante de estabilidad del $\text{Cu}(\text{HDm})_2$ ($\log \beta_2 = 19,7$)
la cual es comparable con el valor obtenido anteriormente por nosotros -
utilizando el método de las soluciones correspondientes ($\log \beta_2 = 20,7$).


M. Pilar Collado

IV.3. EXPERIENCIAS EN LECHO FLUIDIZADO

Las experiencias en lecho fluidizado para obtener datos cinéticos sobre la velocidad de secado, se suelen plantear tal como se indicó en la introducción, tratando de obtener datos isotermos.

Se puede trabajar con un lecho inerte fácilmente separable del producto que se seca y con idénticas características desde el punto de vista fluidodinámico, al que se adiciona el producto del que se desea obtener la cinética. Esto exige la toma de muestras en el lecho en tiempos conocidos y, previa separación del inerte, la determinación de humedad en la forma usual.

Si se opera utilizando el mismo producto que se desea secar, como inerte, es preciso secarlo previamente. La adición del producto húmedo y posterior toma de muestras presenta la dificultad, en la determinación de humedad, de que debido a la dilución provocada por el producto seco, se precisa utilizar un método de determinación de humedad por vía química.

Con ambas formas de operar, se puede conseguir que la experiencia sea prácticamente isoterma, si el producto que se seca no presenta una cinética que permita pensar en la utilización de un secado en arrastre neumático, ya que precisará una gran relación de inerte a alimentación húmeda, para que no se produzca prácticamente variación entre la temperatura de entrada y salida del aire en el lecho. Esta posibilidad de no conseguir la evolución de la experiencia en forma prácticamente isoterma, es la que sirvió de base para intentar utilizarla de tal forma que permita definir que el secado en transporte neumático es adecuado en un caso concreto.

Se tiene, por lo tanto, el problema de interpretar la variación de temperatura que tiene lugar en la experiencia

de secado en lecho fluidizado, operando con inerte y en la que evidentemente no se puede obtener la cinética de secado, pues la velocidad es suficientemente grande para que no sea posible obtener muestras en el intervalo de tiempo disponible.

A continuación se expone el tratamiento de los resultados experimentales previo a la utilización de un método estadístico análogo al empleado anteriormente en transporte neumático, mediante los niveles de significación de las variables estudiadas.

IV.3.1. Tratamiento de los resultados experimentales

La variación de temperatura en una experiencia de secado en lecho fluidizado, realizada con un producto húmedo, para el que pueda emplearse el secado en transporte neumático en la forma descrita, indica que una cierta cantidad de calor ha sido transmitida al sólido que se alimenta húmedo.

Esta cantidad de calor se emplea en evaporar agua y elevar la temperatura del producto húmedo. En cuanto a la importancia relativa de ambos fenómenos, es lógico suponer que inicialmente es más importante la cantidad de calor empleada en la evaporación que la utilizada en dar calor sensible al producto.

Cuando la temperatura del aire que sale desciende por debajo de la temperatura inicial del lecho, es evidente que tiene que tener lugar simultáneamente la cesión de calor sensible del lecho inerte al aire y a las partículas del producto húmedo.

La evaluación del balance térmico a partir de las medidas de variación de la temperatura, puede permitir en principio la estimación de la evaporación y por ello la de su velocidad, esto es, la velocidad de secado, si se tiene la

variación de la temperatura en función del tiempo transcurrido después de la adición de producto húmedo al lecho fluidizado constituido por el inerte.

Con este planteamiento de utilización de los datos experimentales, a continuación se ordena su tratamiento considerando el ajuste de las curvas temperatura-tiempo, el balance térmico, estableciéndolo en varias formas aproximadas, y elección del que se considera más representativo para determinar las velocidades de evaporación.

IV.3.2. Ajuste de los datos experimentales de variación de la temperatura con el tiempo

Como base para la correlación de resultados experimentales, se eligieron diferentes modelos

$$T = A - B \theta$$

$$T\theta = A$$

$$T = A + \ln \theta$$

$$T = A + \frac{1}{\ln \theta}$$

$$T = A + \frac{B}{\ln \theta}$$

$$T = A + \frac{B}{\exp. C \theta}$$

El tratamiento de resultados se ha realizado utilizando:

SHARE PROGRAM LIBRARY - SDA. 3094-01

Autor: D.W. MARQUARDT

Nombre: NLIN

Título: LEAST SQUARES ESTIMATION OF NON LINEAR PARAMETERS.

Lenguaje: FORTRAN 4.

Los modelos que mostraron una menor desviación entre valores experimentales y predichos fueron:

a) Lineal $T = A - B \theta$

b) Exponencial $T = A + \frac{B}{\exp. C \theta}$

En las tablas 145 a 150 se dan los valores de las constantes A, B y C obtenidas en cada caso. Las desviaciones correspondientes entre modelo y los valores experimentales se muestran en las figuras 37 a 51.

Al modelo lineal se ajustan 19 experimentos y al exponencial 71 de los 90 experimentos en lecho fluidizado.

Una vez que se dispone de las ecuaciones ajustadas temperatura-tiempo cada 5 segundos, se puede obtener por medio del cálculo los valores de la temperatura cada segundo. Con ellos disponiendo del balance de calor, se obtiene la variación de la humedad segundo a segundo. Se podría, a partir de este momento, ajustar los valores obtenidos a un nuevo modelo matemático y definir así la variación de la humedad con el tiempo, o bien derivar la ecuación $dH/d\theta$ y obtener directamente las velocidades de secado, que para el valor de $\theta = 0$ dará las velocidades iniciales calculadas más adelante.

IV.3.3. Balance térmico

La variación continua de temperatura en el lecho durante el experimento, y la constancia de temperatura del aire caliente a su entrada al lecho, hace que sea necesario aceptar algunas simplificaciones en el balance térmico. En cualquier caso puede establecerse un balance por incrementos en intervalos de tiempo y obtener el balance global como suma de los parciales.

TABLA 145

Valores de las constantes de ajuste para las variaciones temperatura-tiempo

Experimento correspondiente a la tabla.	Modelo matemático	A	B	C
31	Lineal	45,00	0,20	
32	Lineal	55,00	0,20	
33	Lineal	65,00	0,25	
34	Exponencial	33,17	11,81	0,0573
35	Lineal	54,30	0,27	
36	Exponencial	56,01	9,03	0,0557
37	Lineal	45,00	0,20	
38	Lineal	54,80	0,24	
39	Lineal	64,80	0,24	
40	Lineal	44,55	0,19	
41	Lineal	54,75	0,20	
42	Lineal	65,80	0,24	
43	Exponencial	25,37	19,89	0,0441
44	Exponencial	26,01	29,65	0,0406
45	Lineal	65,00	0,88	
46	Exponencial	34,56	10,51	0,1650
47	Exponencial	44,50	10,53	0,1350

TABLA 146

Valores de las constantes de ajuste para las variaciones temperatura-tiempo

Experimento correspondiente a la tabla.	Modelo matemático	A	B	C
48	Exponencial	47,34	17,87	0,0435
49	Exponencial	27,40	17,73	0,0674
50	Exponencial	30,89	24,53	0,0608
51	Exponencial	32,95	32,15	0,0651
52	Exponencial	25,60	20,14	0,0512
53	Exponencial	25,47	30,59	0,0447
54	Exponencial	16,90	49,07	0,0297
55	Exponencial	28,97	16,22	0,0366
56	Exponencial	30,61	25,04	0,0502
57	Exponencial	32,23	33,09	0,0395
58	Exponencial	34,55	10,53	0,0777
59	Exponencial	44,50	10,53	0,1350
60	Exponencial	57,00	8,00	0,1380
61	Exponencial	22,92	21,85	0,0686
62	Exponencial	27,35	27,36	0,0793
63	Exponencial	28,91	37,06	0,0552
64	Exponencial	22,71	21,52	0,0721

TABLA 147

Valores de las constantes de ajuste para las variaciones temperatura-tiempo

Experimento correspondiente a la tabla.	Modelo matemático	A	B	C
65	Exponencial	27,13	27,41	0,1220
66	Exponencial	29,71	34,84	0,1470
67	Exponencial	90,16	9,82	0,0717
68	Exponencial	74,53	25,86	0,0906
69	Exponencial	93,50	6,52	0,1330
70	Exponencial	77,25	22,76	0,0742
71	Exponencial	95,99	4,69	0,1990
72	Exponencial	77,75	22,48	0,6040
73	Exponencial	84,00	16,00	0,0575
74	Exponencial	77,30	28,94	0,0738
75	Exponencial	95,30	4,69	0,1990
76	Exponencial	75,48	24,52	0,1900
77	Exponencial	94,66	5,33	0,2770
78	Exponencial	88,28	11,70	0,3720
79	Exponencial	96,00	4,00	0,1380
80	Exponencial	91,37	8,61	0,1710
81	Exponencial	46,62	53,38	0,0077

TABLA 148

Valores de las constantes de ajuste para las variaciones temperatura-tiempo

Experimento correspondiente a la tabla.	Modelo matemático	A	B	C
82	Exponencial	43,30	52,73	0,0207
83	Exponencial	46,62	53,38	0,0077
84	Exponencial	89,50	10,52	0,1350
85	Lineal	173,98	0,59	
86	Exponencial	143,93	31,39	0,1130
87	Exponencial	162,50	12,50	0,1020
88	Exponencial	150,32	24,73	0,1550
89	Exponencial	148,28	26,74	0,0161
90	Exponencial	157,89	17,17	0,0186
91	Exponencial	165,20	9,80	0,2500
92	Exponencial	141,67	33,33	0,1680
93	Exponencial	166,66	8,33	0,1830
94	Exponencial	150,53	24,47	0,1910
95	Exponencial	168,75	6,25	0,3210
96	Exponencial	153,03	21,96	0,3380
97	Exponencial	164,56	10,42	0,2810
98	Exponencial	144,29	30,76	0,1360

TABLA 149

Valores de las constantes de ajuste para las variaciones temperatura-tiempo

Experimento correspondiente a la tabla.	Modelo matemático	A	B	C
99	Exponencial	172,47	2,52	0,3140
100	Exponencial	163,16	11,84	0,1810
101	Exponencial	170,50	4,50	0,2190
102	Exponencial	72,02	101,20	0,0059
103	Lineal	248,50	0,45	
104	Exponencial	209,47	40,56	0,1370
105	Lineal	248,0	0,46	
106	Exponencial	212,18	38,09	0,1160
107	Lineal	249,0	0,55	
108	Exponencial	223,55	26,45	0,2830
109	Lineal	248,40	0,71	
110	Exponencial	205,67	44,26	0,1160
111	Lineal	247,80	0,47	
112	Exponencial	220,10	30,12	0,1560
113	Lineal	249,50	0,39	
114	Exponencial	222,64	27,34	0,2590
115	Exponencial	234,37	15,70	0,1290

TABLA 150

Valores de las constantes de ajuste para las variaciones temperatura-tiempo

Experimento correspondiente a la tabla	Modelo matemático	A	B	C
116	Exponencial	222,17	27,79	0,2460
117	Exponencial	228,94	21,05	0,5990
118	Exponencial	215,24	34,76	0,2530
119	Lineal	248,40	0,42	
120	Exponencial	227,50	22,50	0,2190

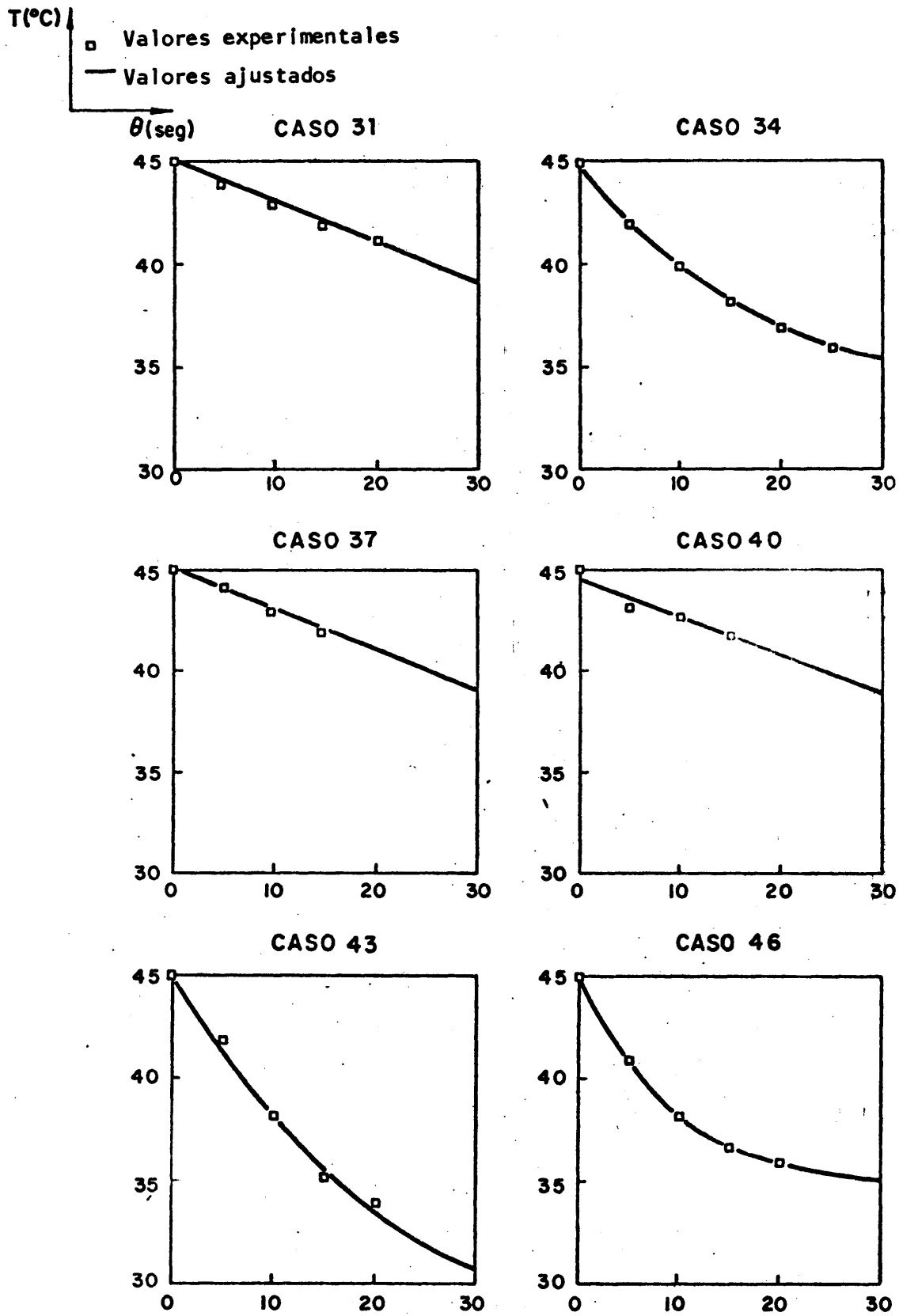


FIGURA 37

Variación de la temperatura con el tiempo

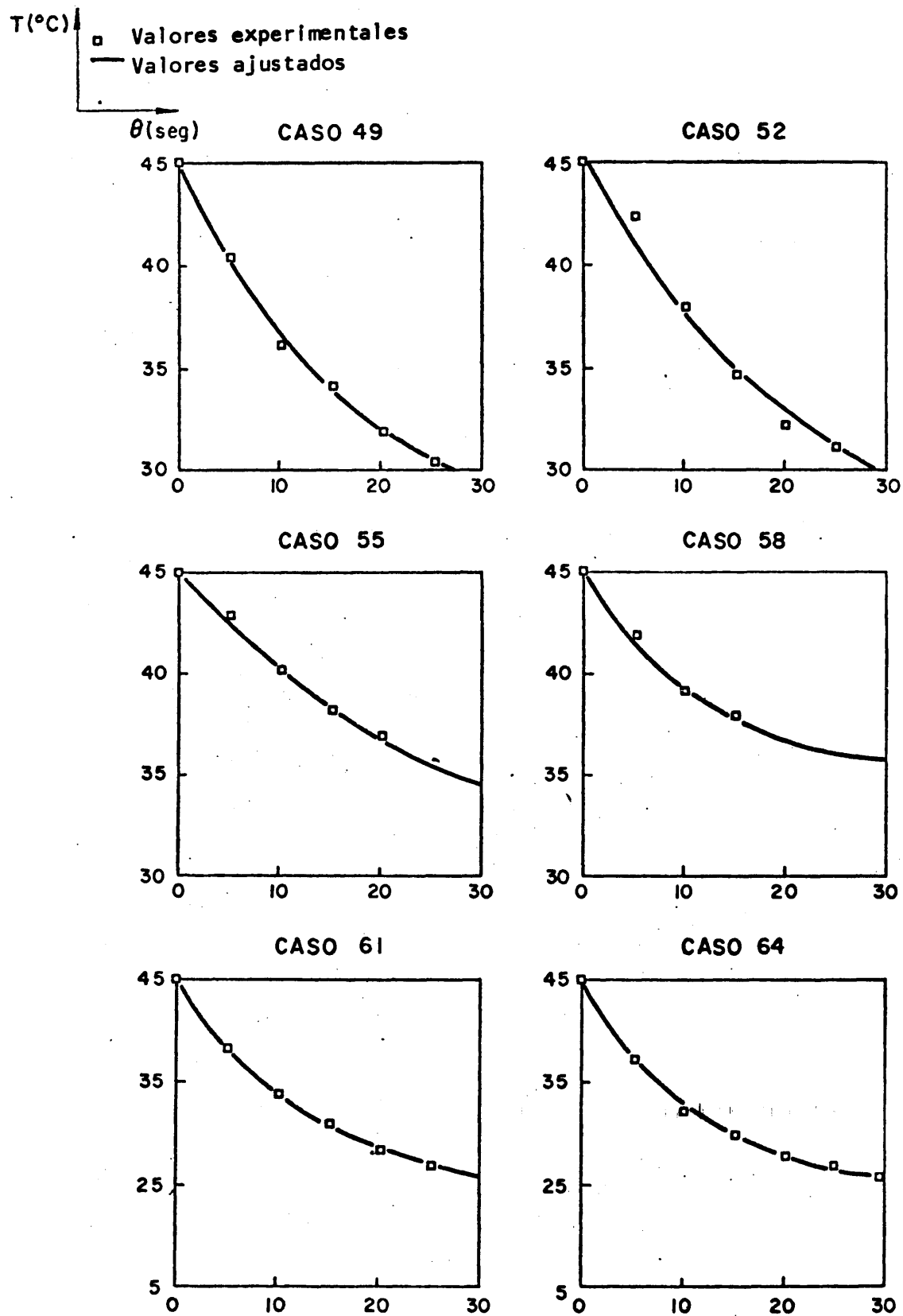


FIGURA 38

Variación de la temperatura con el tiempo

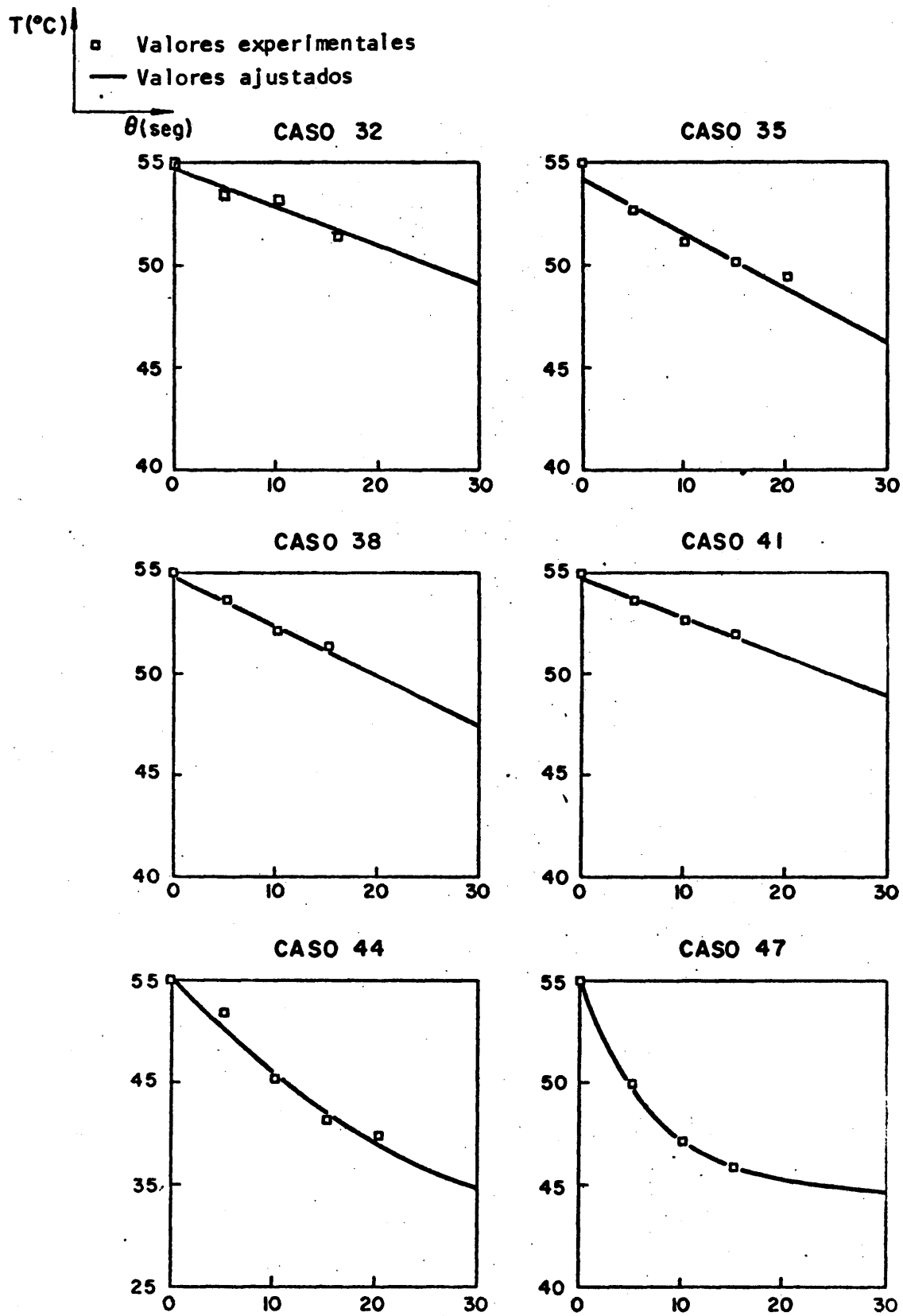


FIGURA 39

Variación de la temperatura con el tiempo

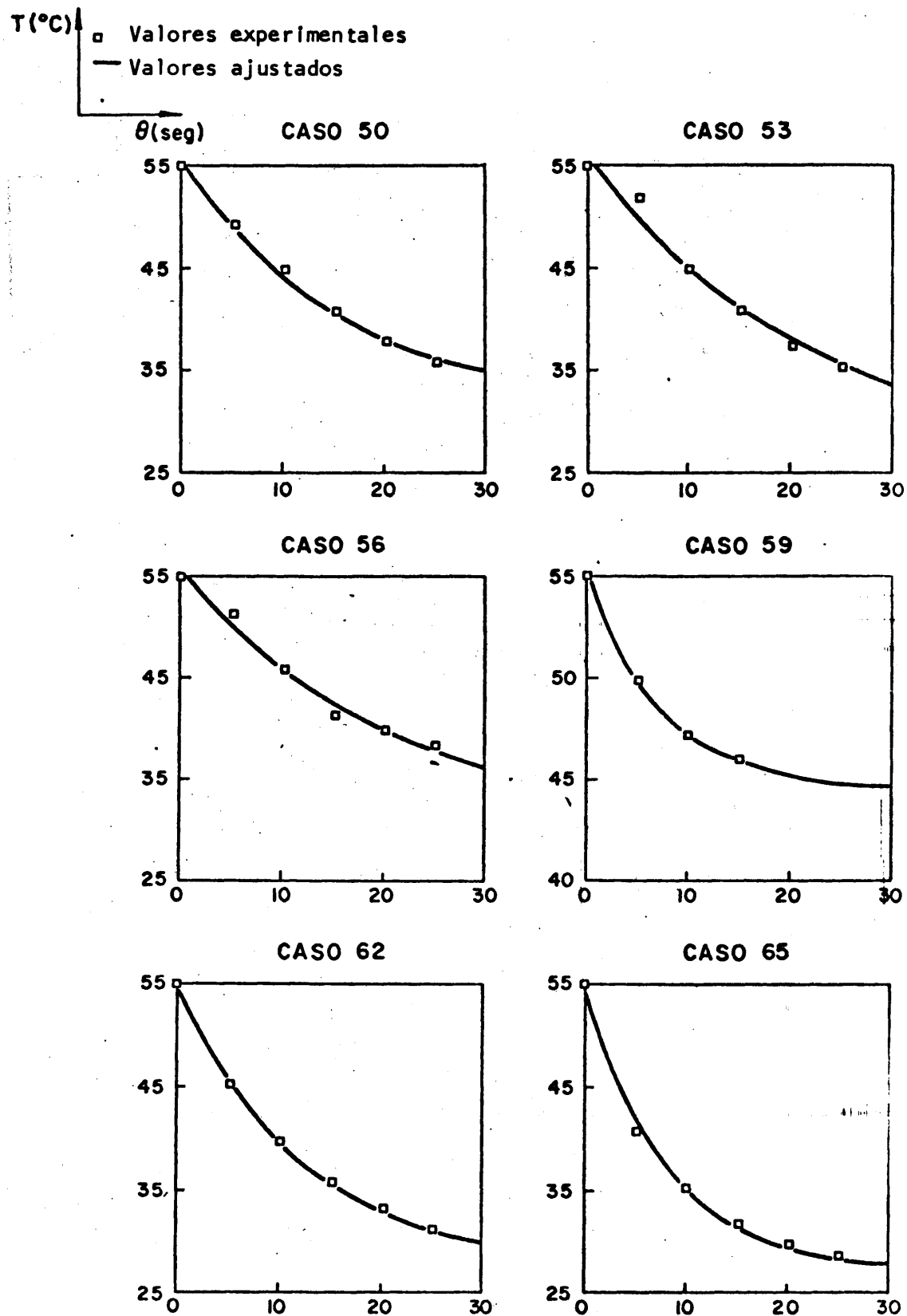


FIGURA 40

Variación de la temperatura con el tiempo

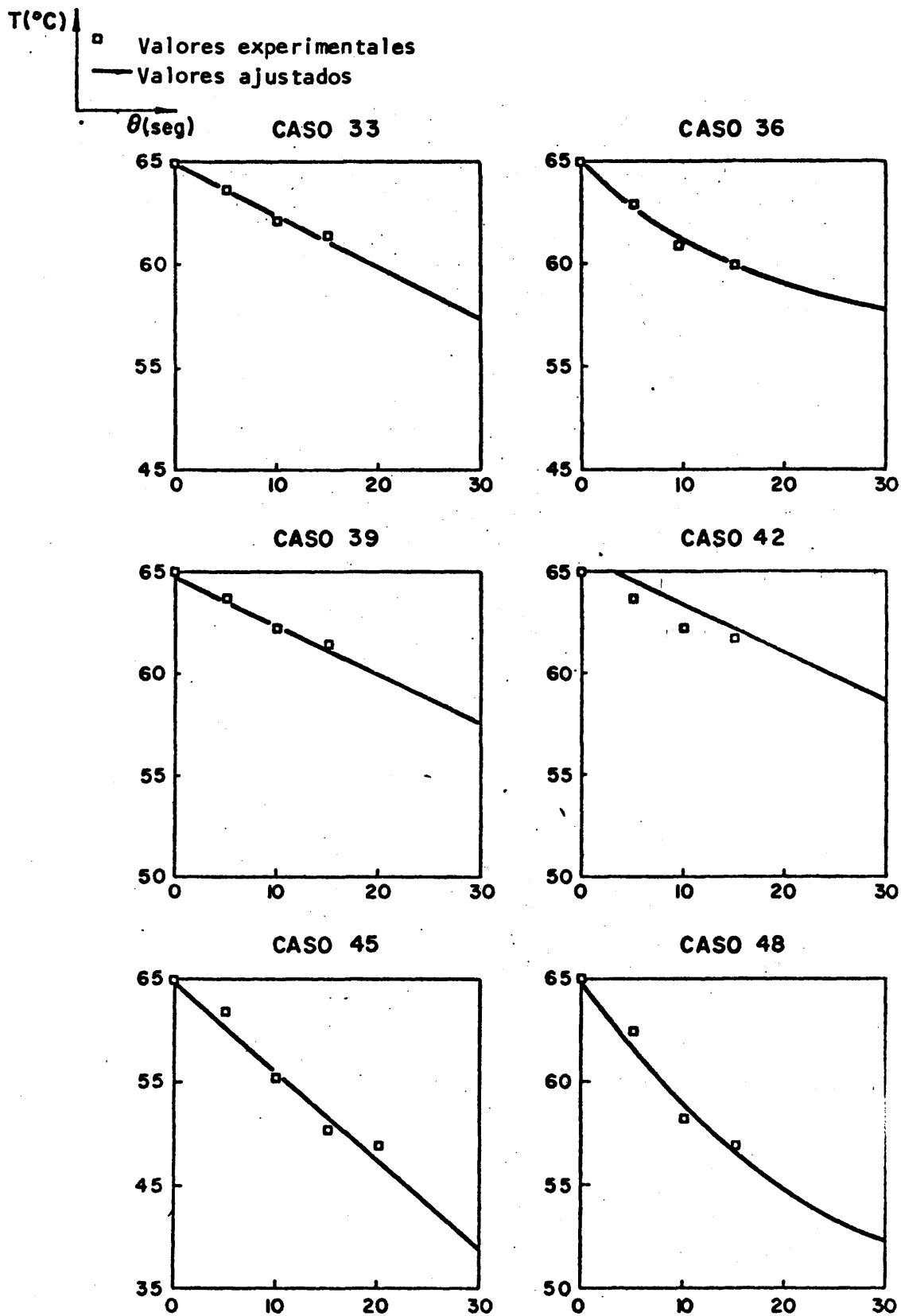


FIGURA 41

Variación de la temperatura con el tiempo

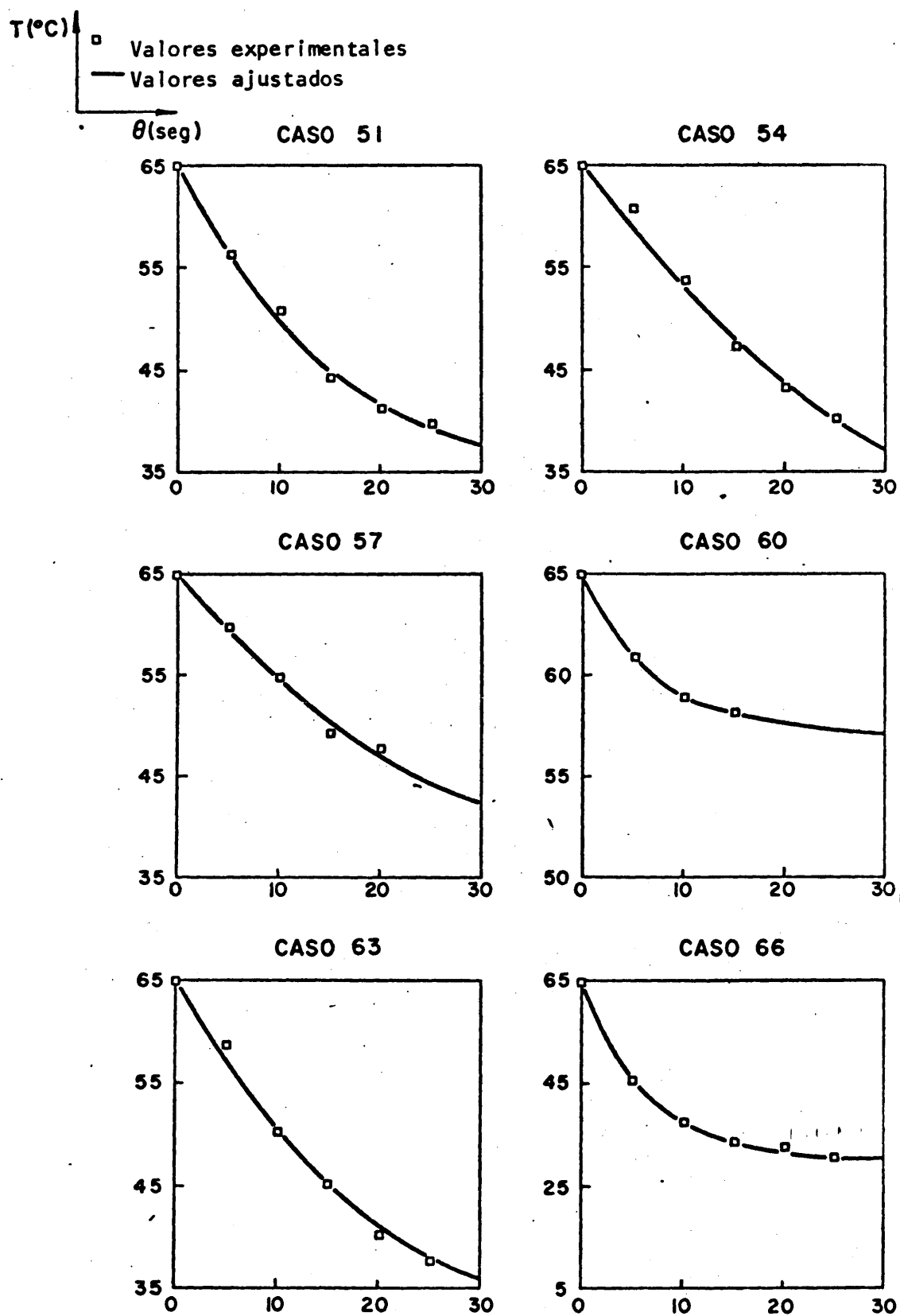


FIGURA 42

Variación de la temperatura con el tiempo

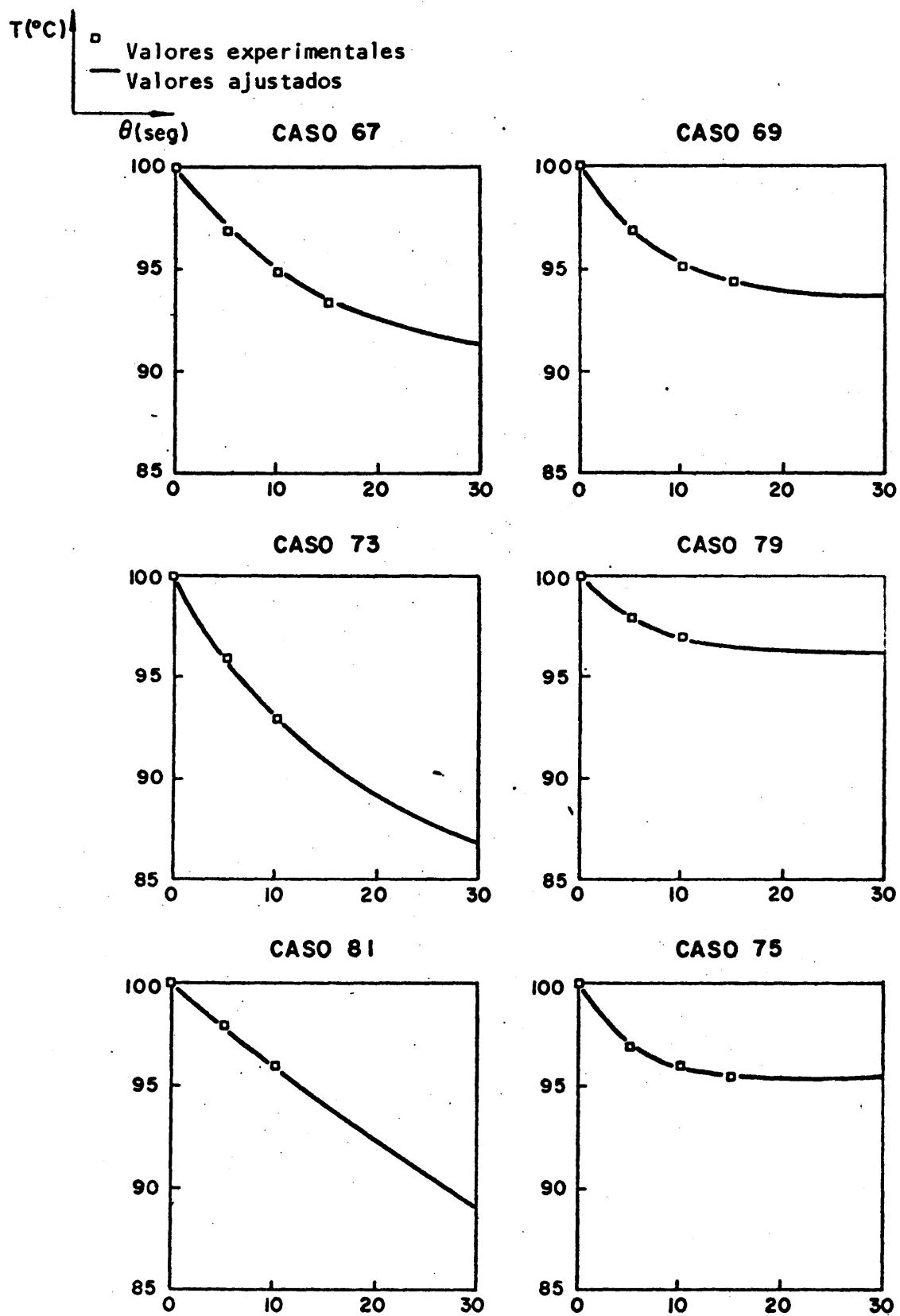


FIGURA 43

Variación de la temperatura con el tiempo

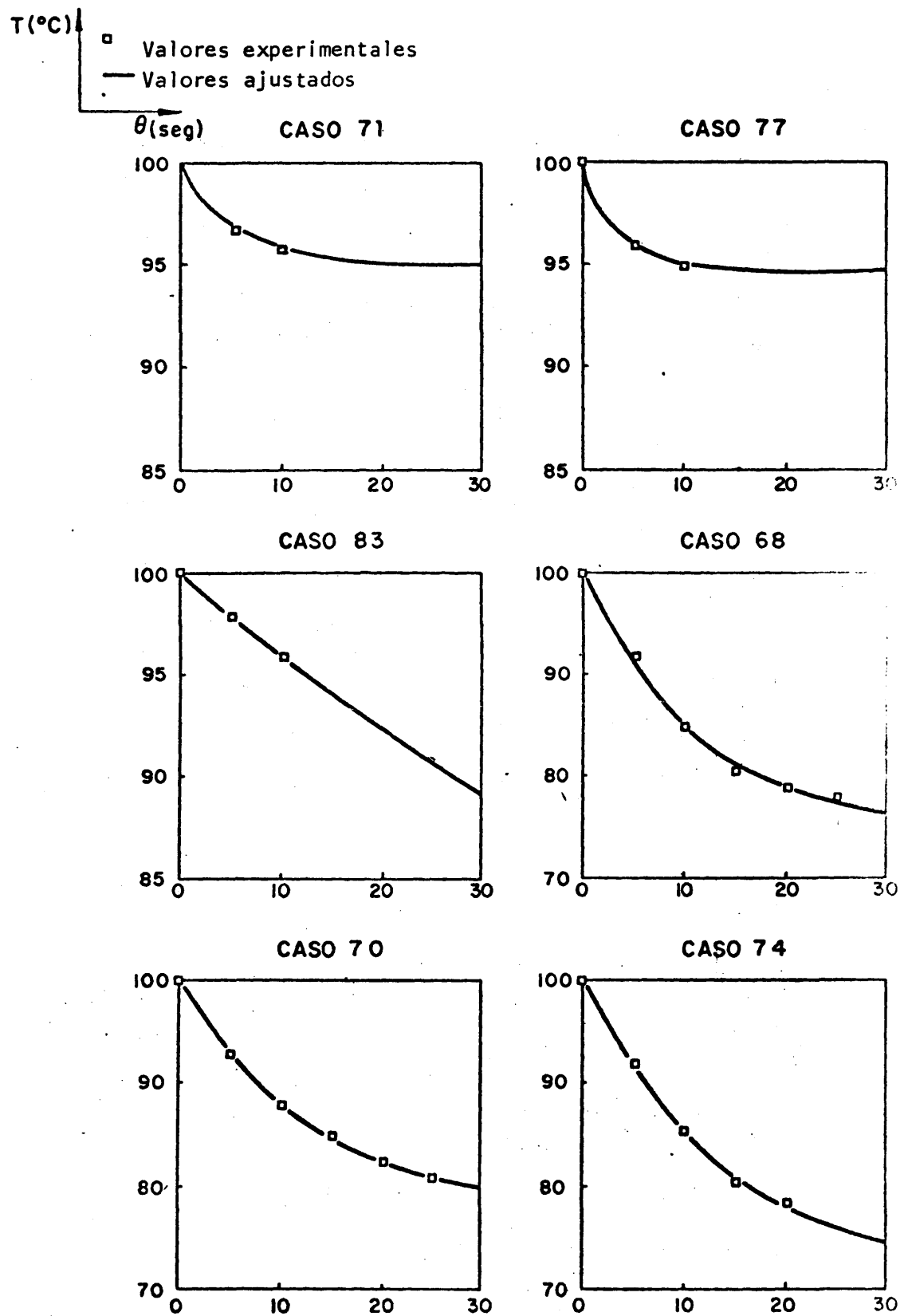


FIGURA 44

Variación de la temperatura con el tiempo

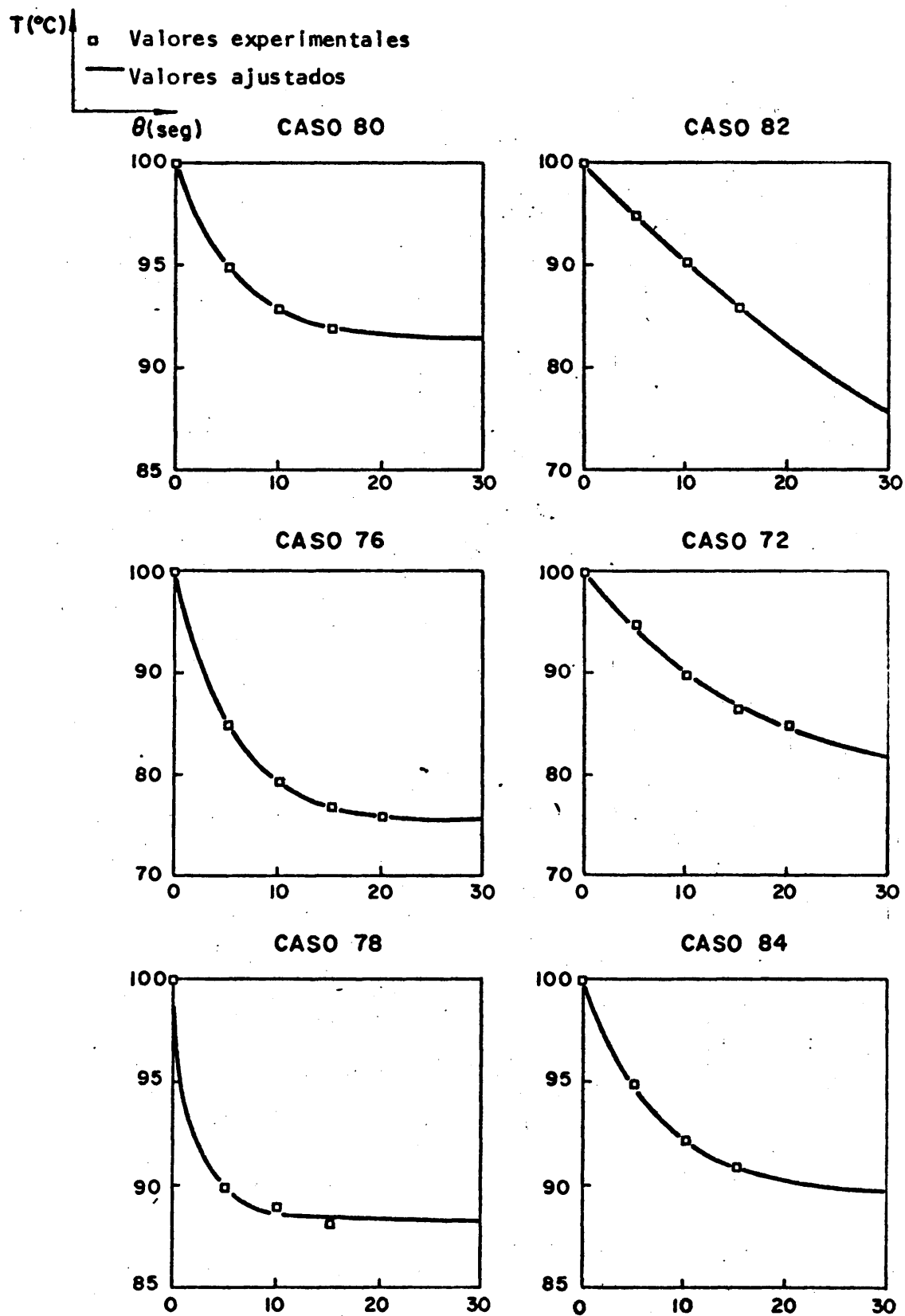


FIGURA 45

Variación de la temperatura con el tiempo

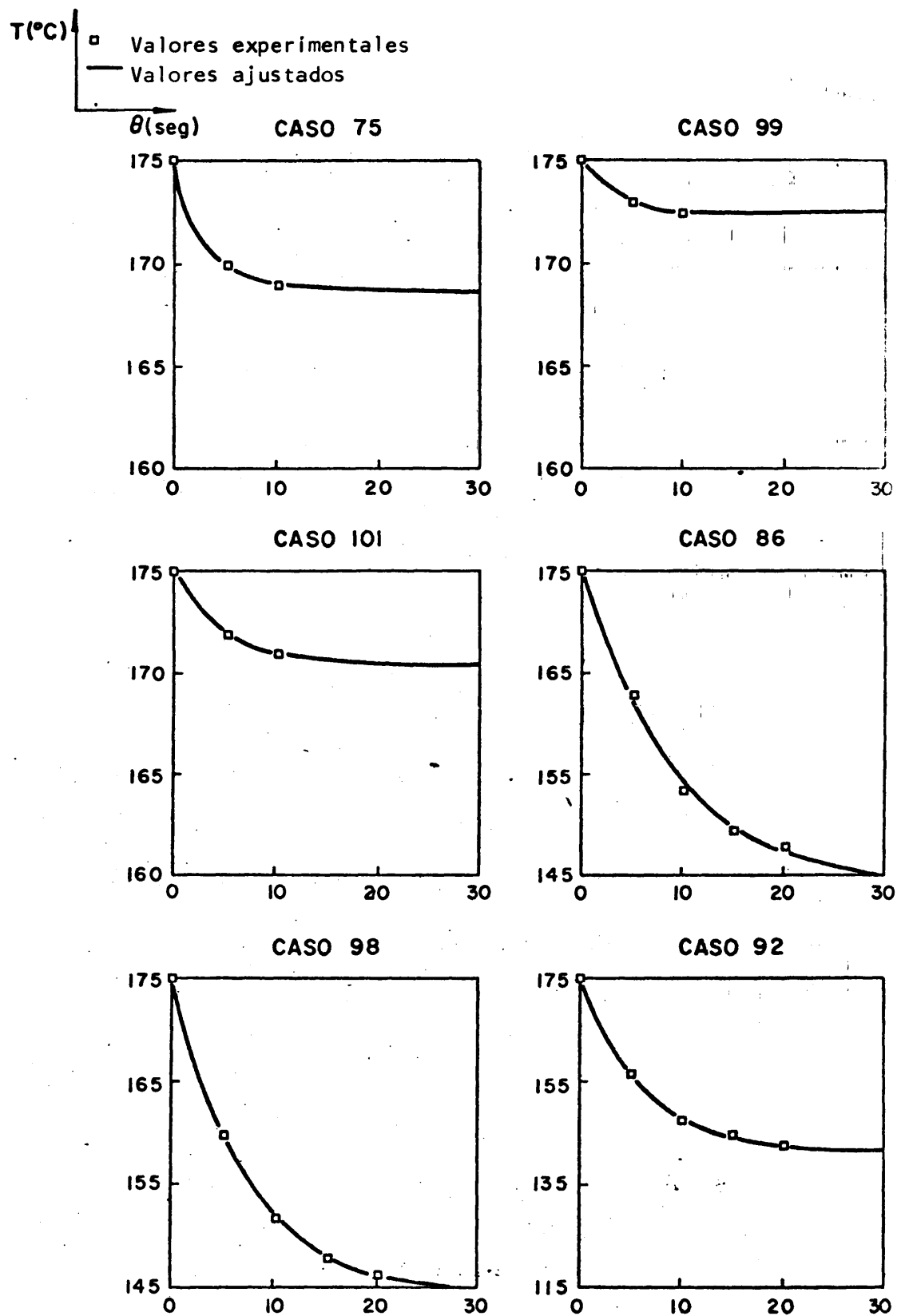


FIGURA 46

Variación de la temperatura con el tiempo

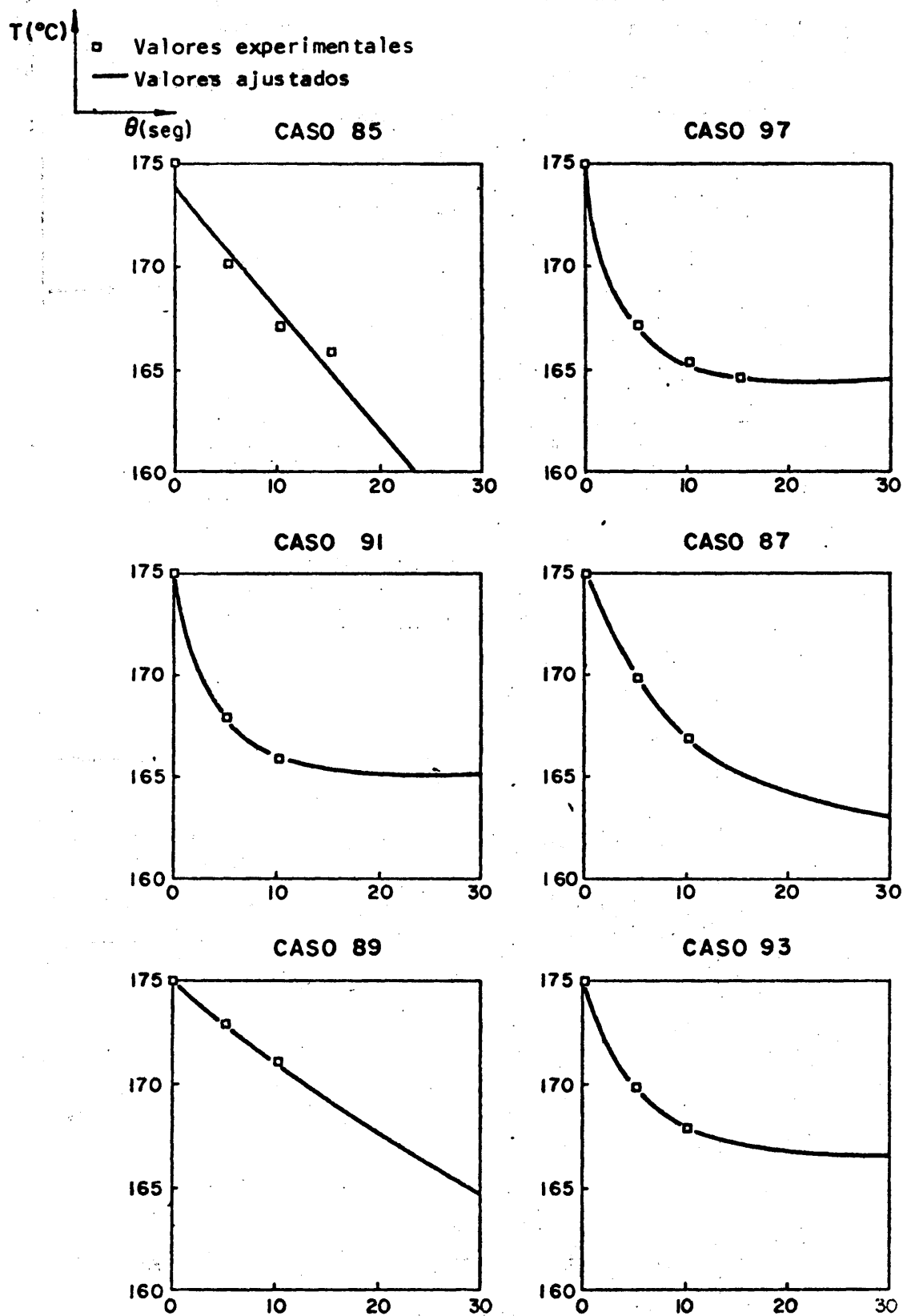


FIGURA 47

Variación de la temperatura con el tiempo

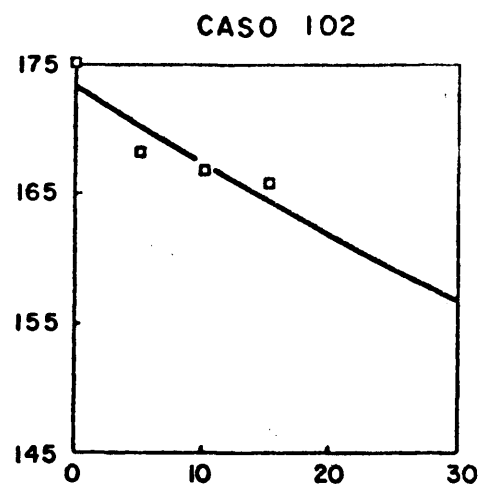
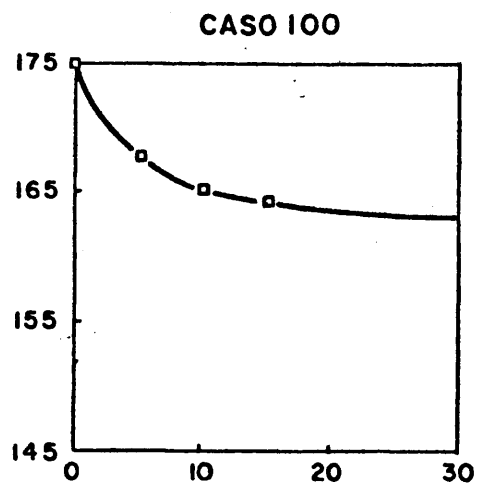
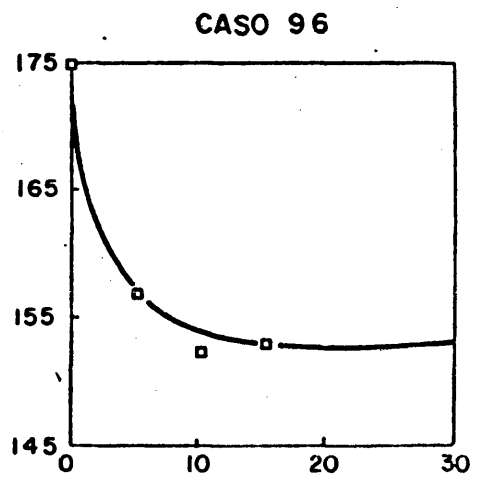
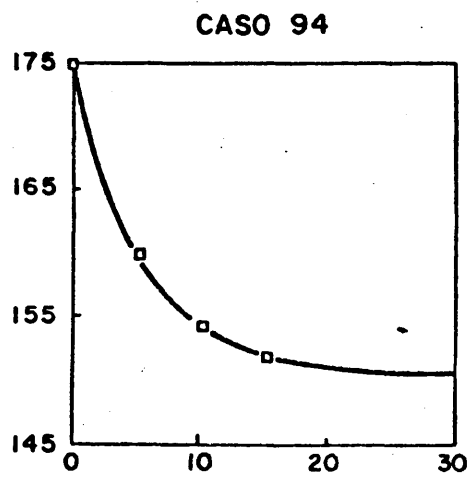
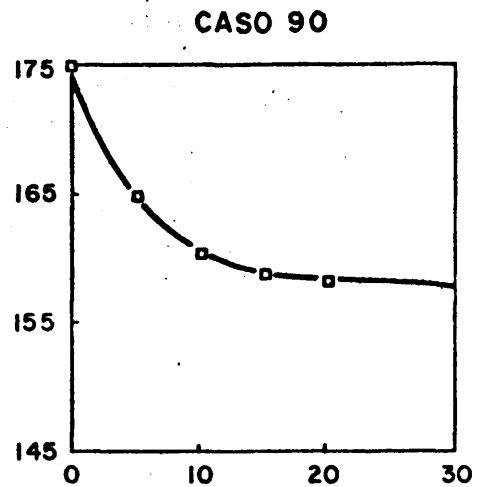
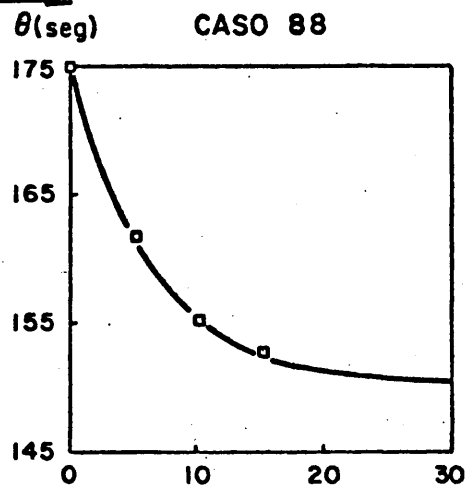
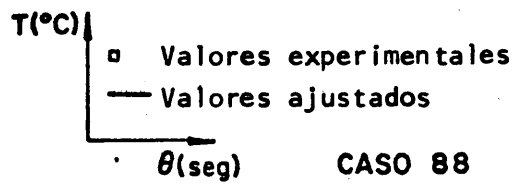


FIGURA 48

Variación de la temperatura con el tiempo

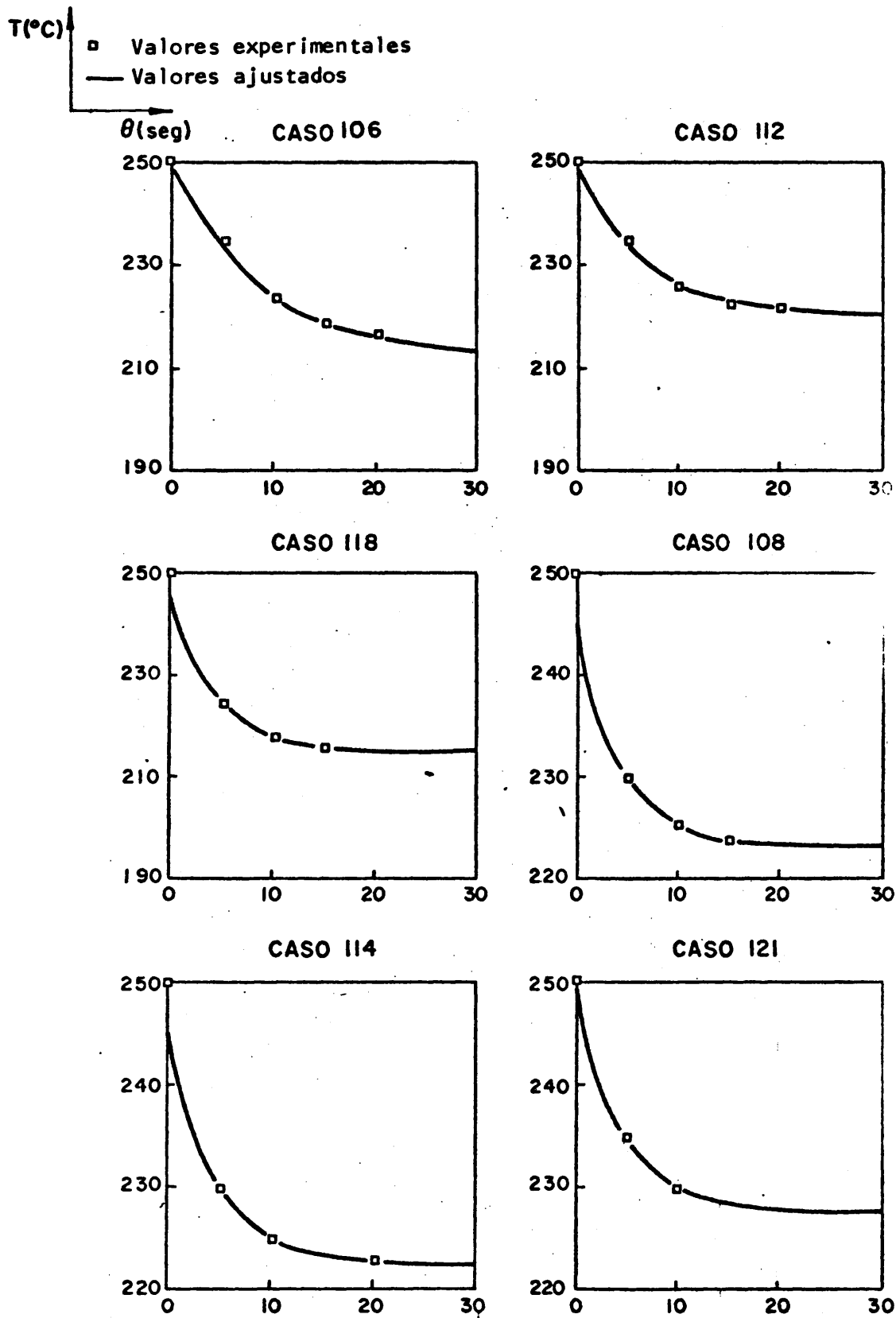


FIGURA 49

Variación de la temperatura con el tiempo

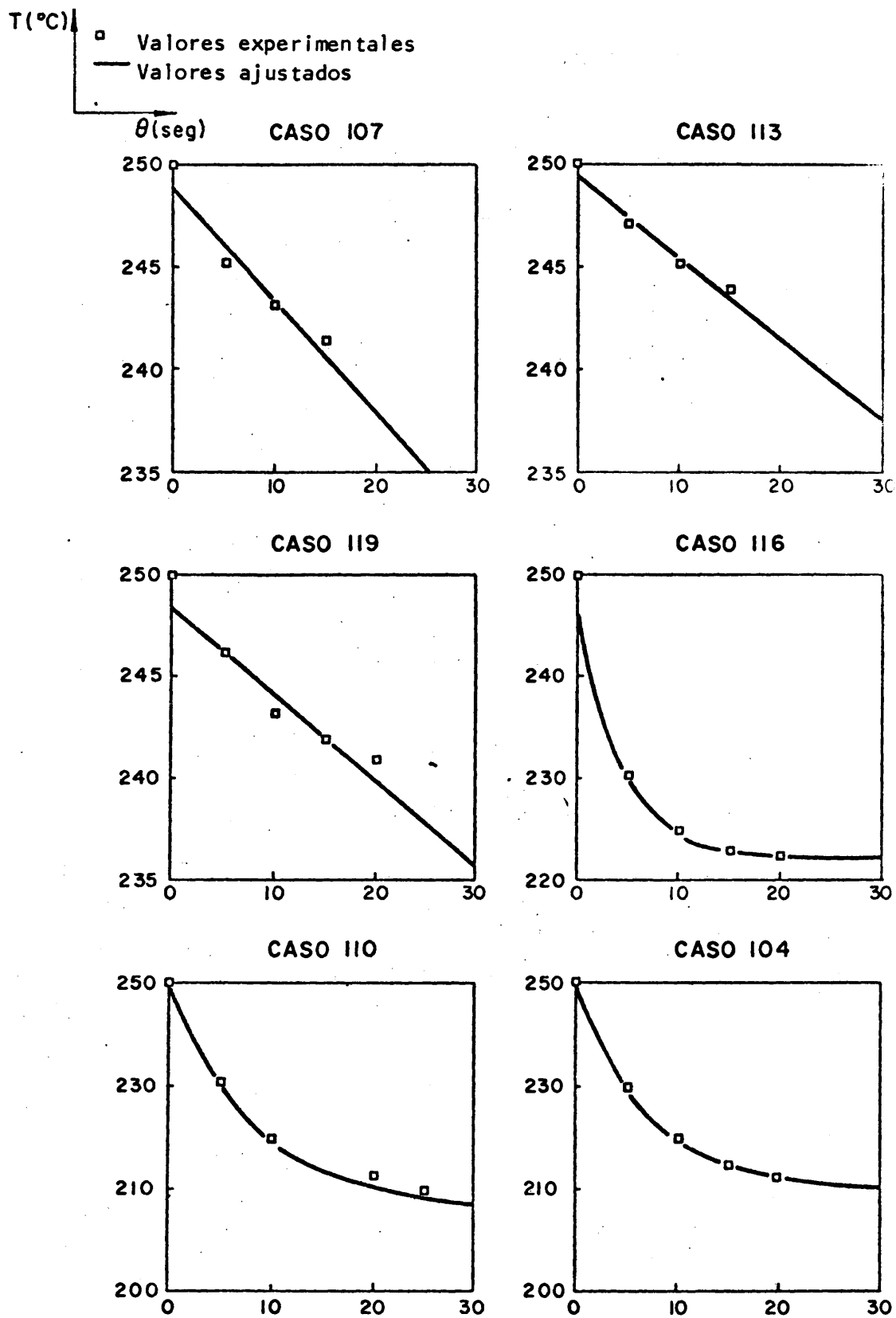


FIGURA 50

Variación de la temperatura con el tiempo

$T(^{\circ}\text{C})$ \square Valores experimentales
 — Valores ajustados
 $\theta(\text{seg})$

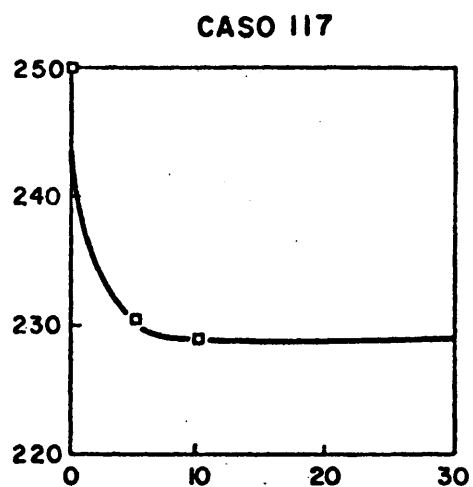
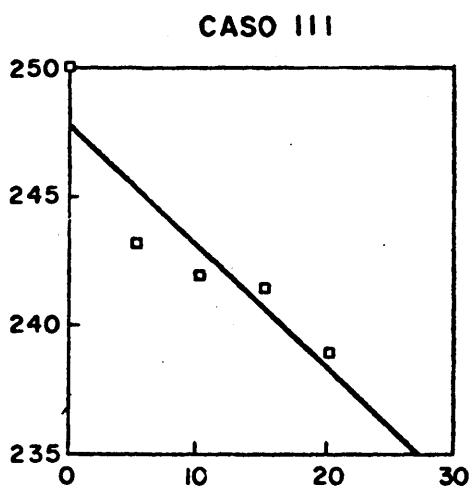
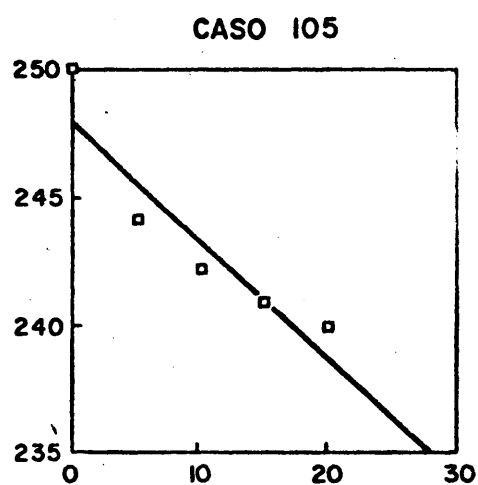
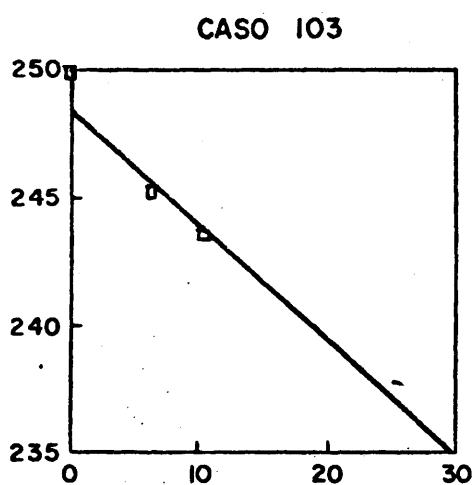
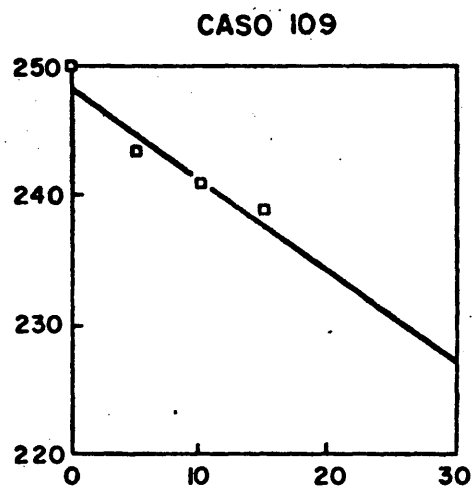
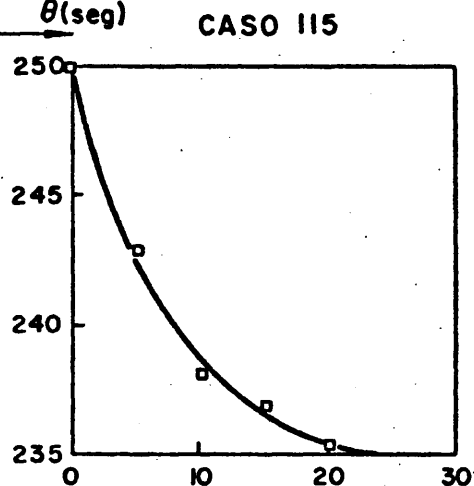


FIGURA 51

Variación de la temperatura con el tiempo

Procediendo de esta forma se obtiene un balance riguroso en el que los intervalos de la sumatoria de T_i , corresponden a tiempos de un segundo.

Balance Térmico

Entre el tiempo θ_0 y θ_1 ; $\theta_1 - \theta_0 = 1 \text{ seg.}$

$$m_a c_a (T_0 - T_1) + m_s c_s (T_0 - T_1) = (m_{H0} - m_{H1}) \lambda$$

Entre el tiempo θ_1 y θ_2 ; $\theta_2 - \theta_1 = 1 \text{ seg.}$

$$m_a c_a (T_0 - T_2) + m_s c_s (T_1 - T_2) = (m_{H1} - m_{H2}) \lambda$$

Entre el tiempo θ_i y θ_{i+1} ; $\theta_{i+1} - \theta_i = 1 \text{ seg.}$

$$m_a c_a (T_0 - T_{i+1}) + m_s c_s (T_i - T_{i+1}) = (m_{Hi} - m_{Hi+1}) \lambda$$

Entre el tiempo θ_{n-1} y θ_n ; $\theta_n - \theta_{n-1} = 1 \text{ seg.}$

$$m_a c_a (T_0 - T_n) + m_s c_s (T_{n-1} - T_n) = (m_{Hn-1} - m_{Hn}) \lambda$$

El balance térmico total se obtiene sumando los balances parciales.

$$m_a c_a \left[(T_0 - T_1) + (T_0 - T_2) + \dots + (T_0 - T_{i+1}) + \dots + (T_0 - T_n) \right] + m_s c_s (T_0 - T_n) = (m_{H0} - m_{Hn}) \lambda$$

$$n \cdot m_a c_a T_0 - m_a c_a \sum_{i=1}^n T_i + m_s c_s (T_0 - T_n) = (m_{H0} - m_{Hn}) \lambda$$

$$H = \frac{m_H}{m_s}$$

$$\frac{n \cdot m_a c_a T_0}{m_s} - \frac{m_a c_a \sum_{i=1}^n T_i}{m_s} + \frac{m_s c_s (T_0 - T_n)}{m_s} = (H_0 - H_n) \lambda$$

θ = Tiempo (s)
 T = Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
 m_a = Masa de aire (Kg)
 m_s = Masa de sólido seco (Kg)
 m_H = Masa de agua correspondiente a la humedad H (Kg)
 c_s = Calor específico del sólido ($\text{Kcal/Kg} \times ^{\circ}\text{C}$)
 c_a = Calor específico del aire ($\text{Kcal/Kg} \times ^{\circ}\text{C}$)
 λ = Calor de vaporización del agua (Kcal/Kg)
 H = Humedad (Kg agua/Kg cuerpo seco)

La utilización de este balance conduce, cuando se emplea con la ecuación ajustada temperatura-tiempo, a un contrasentido, la velocidad de secado aumenta con el tiempo o lo que es lo mismo al disminuir la humedad.

De acuerdo con ello este balance aparentemente riguroso se ajusta para el caso de tiempos cortos, pero no para valores muy bajos de humedad que corresponderían a tiempos largos de residencia.

El efecto teórico de variación de la humedad frente al tiempo se representa con la figura 52. En ella puede apreciarse la forma real de la curva frente a la que en el caso límite, debería obtenerse y se aprecia que ambas coinciden a tiempos cortos de análisis de los datos.

Teniendo en cuenta este razonamiento, cabe la posibilidad, aceptando una serie de consideraciones, de hacer un balance lineal más simplificado y que permita el estudio de la variación de humedad frente al tiempo en los primeros segundos. Este balance que sin duda no es aparentemente tan riguroso como el detallado anteriormente, explica mejor el fenómeno y además coincide durante los primeros segundos con la forma de la curva ideal y con la obtenida por aplicación de los resultados experimentales. A continuación se indica el procedimiento para definir el balance general, que

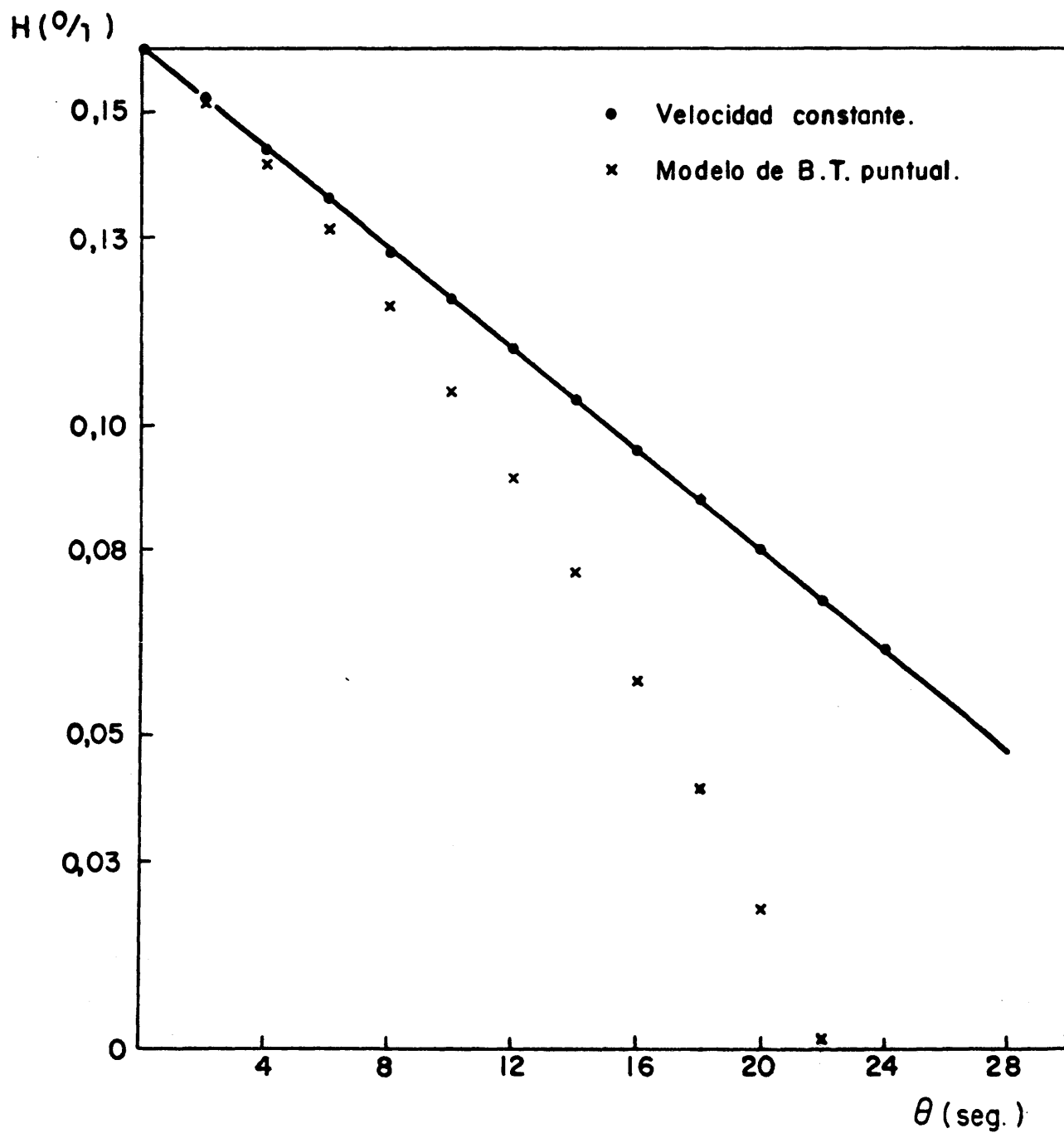


FIGURA 52

Variación de la humedad con el tiempo utilizando el balance
térmico puntual y en el caso de velocidad constante

de nuevo está basada en un análisis de incrementos segundo a segundo.

Balance de calor simplificado

Entre el tiempo θ_0 y θ_1 ; $\theta_1 - \theta_0 = 1 \text{ seg.}$

$$m_a c_a (T_0 - T_1) + m_s c_s (T_0 - T_1) = (m_{H_0} - m_{H_1}) \lambda$$

Entre el tiempo θ_1 y θ_2 ; $\theta_2 - \theta_1 = 1 \text{ seg.}$

$$m_a c_a (T_1 - T_2) + m_s c_s (T_1 - T_2) = (m_{H_1} - m_{H_2}) \lambda$$

Entre el tiempo θ_{n-1} y θ_n ; $\theta_n - \theta_{n-1} = 1 \text{ seg.}$

$$m_a c_a (T_{n-1} - T_n) + m_s c_s (T_{n-1} - T_n) = (m_{H_{n-1}} - m_{H_n}) \lambda$$

El balance de energía total se obtiene sumando los balances parciales.

$$m_a c_a (T_0 - T_n) + m_s c_s (T_0 - T_n) = (m_{H_0} - m_{H_n}) \lambda$$

$$\frac{m_a c_a}{m_s} (T_0 - T_n) + \frac{m_s c_s}{m_s} (T_0 - T_n) = (H_0 - H_n) \lambda$$

$$\left[\frac{m_a c_a + m_s c_s}{m_s} \right] (T_0 - T_n) = (H_0 - H_n) \lambda$$

$$H = H_0 - \frac{1}{\lambda} \left[\frac{m_a c_a + m_s c_s}{m_s} \right] [T_0 - T]$$

En la gráfica de la figura 52, se aprecia la representación de la humedad frente al tiempo, utilizando el balance simplificado, según el cual la velocidad permanece constante en el tiempo, independientemente del valor que tenga la humedad de entrada.

De acuerdo con todo lo mencionado la velocidad de secado a lo largo de todo el proceso permanecería constante e igual a la velocidad inicial. Esto no es absolutamente riguroso pero no introduce errores en las conclusiones finales debido a que la variable que se compara es precisamente la velocidad inicial de secado, que se obtendrá derivando la expresión del balance global y sustituyendo T por la función ajustada del tiempo. Así y para T igual a la temperatura inicial ajustada o lo que es lo mismo para θ igual a 0, se obtiene la velocidad de secado puntual que se compara más adelante con la velocidad media obtenida para el secadero de transporte neumático.

IV.3.4. Justificación del balance elegido

Como se menciona en el capítulo anterior el balance que debería ser más riguroso, acaba por no ajustarse a la realidad debido al hecho de aumentar la velocidad al disminuir el contenido de humedad. En cualquier caso para un estudio de este tipo, la definición de un balance de calor debe ser lo más rigurosa posible, pero teniendo en cuenta que su aplicación se establece en los primeros instantes y por extrapolación a tiempo cero, ha de procurarse utilizar un balance que no introduzca excesivas dificultades en su empleo posterior.

Se debe prestar especial atención a que la definición de los términos del balance sea muy clara y evitar en lo posible parámetros de difícil medición o que hayan de ser estimados. De esta forma se obtienen con facilidad números para la velocidad de secado que aunque afectados de un cierto error, pueden ser utilizados para el cálculo del secadero, debido a la garantía experimental.

El llamado balance simplificado lineal propuesto en el apartado anterior representa el punto medio entre la situa-

ción teórica y la real, por esto se ha elegido para definir las velocidades iniciales.

IV.3.5. Ajuste de las curvas humedad-tiempo

Una vez que se ha seleccionado el balance de energía:

$$H = H_o - \frac{1}{\lambda} \left[\frac{m_a c_a + m_s c_s}{m_s} \right] [T_o - T]$$

se sustituye T por $T = f(\theta)$, y se alcanza una ecuación en la que se puede observar la variación de H con el tiempo.

Dependiendo de que se utilicen los ajustes (T, θ) lineal o exponencial obtendremos funciones similares para la humedad en función del tiempo.

Existe de nuevo la posibilidad de hacer aquí un ajuste matemático de la humedad en función del tiempo, pero para calcular velocidades a tiempo cero no es requerido. Por otra parte su significado debido a la mecánica de obtención utilizada sería discutible.

IV.3.6. Determinación de velocidades iniciales

Derivando las expresiones generales de variación de la humedad con el tiempo, se obtienen los valores de las velocidades de secado, que para el caso de $\theta = 0$, dan las velocidades iniciales que se recogen en las tablas 151 y 152.

IV.3.7. Análisis estadístico

El estudio para determinar los niveles de influencia de las variables con relación a la velocidad inicial de se-

cado, se ha efectuado en forma análoga al realizado en transporte neumático para el caso de velocidades medias.

De nuevo se ha hecho un análisis de la varianza y de acuerdo con una distribución "F de Snedecor" se determinan los niveles de significación de las variables individuales y de sus interacciones. La variable A se ha identificado con la adición al lecho de inerte, la B con la temperatura, la C con el tamaño de grano y la R con la humedad. Si se observa o se supone un nivel de influencia del factor R despreciable, la humedad desaparece como variable y los distintos valores de velocidad inicial se convierten en valores puntuales de un mismo fenómeno con unas A, B y C fijas, repetidos tres veces.

De nuevo y como se observa en las tablas 151 a 154, que se acompañan más adelante, el estudio se ha hecho para los mismos dos estimadores, que en lecho fluidizado $\frac{dH}{d\theta}$ y $\frac{dH}{d\theta} \times \frac{1}{H_0}$.

Aquí también el segundo estimador aparece más sensible que el primero y aunque se presentan los dos, sólo el más sensible se utiliza en la discusión de los niveles de influencia.

IV.3.8. Niveles de significación. Interpretación

En las tablas 155 a 158 se dan los valores calculados de los niveles de significación de las variables estudiadas.

Con objeto de simplificar la nomenclatura, la variable adición se identifica con las siglas AD y las demás tal como se hizo para el transporte neumático como TE, TA y HU.

Del análisis realizado puede concluirse que todos los factores ensayados presentan en algún caso influencia significativa sobre la velocidad de secado, sin embargo y como

TABLA 151

Valores de las velocidades iniciales de secado en lecho
fluidizado a bajas temperaturas ($dH/d\theta_{\theta=0}$)

		H_1	H_2	H_3
45°C	5g	0,00543	0,00343	0,00143
	10	0,00340	0,00423	0,00423
	20	0,00239	0,00199	0,00118
	50	0,00120	0,00120	0,00120
	100	0,00062	0,00062	0,00062
55°C	5	0,00219	0,00187	0,00152
	10	0,00471	0,00543	0,00543
	20	0,00302	0,00267	0,00254
	50	0,00176	0,00176	0,00176
	100	0,00135	0,00135	0,00135
65°C	5	0,00411	0,00189	0,00154
	10	0,00347	0,00299	0,00299
	20	0,00428	0,00287	0,00266
	50	0,00167	0,00167	0,00167
	100	0,00210	0,00210	0,00210

TABLA 152

Valores de las velocidades iniciales de secado en lecho fluidizado a altas temperaturas
($dH/d\theta \text{ } \theta = 0$)

		100°C		175°C		250°C	
		5 g	20 g	5 g	20 g	5 g	20 g
H ₁	650 μ	0,00610	0,00508	0,00497	0,00739	0,00366	0,01130
	410	0,00779	0,00452	0,02140	0,01220	0,00586	0,01060
	265	0,00368	0,00245	0,02570	0,00923	0,01830	0,01450
H ₂	650 μ	0,00865	0,00422	0,00784	0,00590	0,00311	0,00751
	410	0,00659	0,00822	0,01120	0,00864	0,00350	0,00872
	265	0,00299	0,00196	0,00420	0,00284	0,07900	0,01380
H ₃	650 μ	0,07940	0,03020	0,00309	0,00573	0,00304	0,01030
	410	0,01280	0,00945	0,01400	0,01290	0,00212	0,00947
	265	0,00323	0,00277	0,00588	0,00089	0,00216	0,00636

TABLA 153

Valores de las velocidades iniciales relativas a la
humedad inicial en lecho fluidizado a bajas temperaturas
($dH/H_0 d\theta_{\theta=0}$)

		<u>H₁</u>	<u>H₂</u>	<u>H₃</u>
45°C	5 g	0,0340	0,0290	0,0156
	10	0,0287	0,0459	0,0459
	20	0,0150	0,0168	0,0128
	50	0,0075	0,0075	0,0075
	100	0,0039	0,0039	0,0039
55°C	5	0,0137	0,0158	0,0166
	10	0,0398	0,0589	0,0589
	20	0,0189	0,0226	0,0275
	50	0,0110	0,0110	0,0110
	100	0,0085	0,0085	0,0085
65°C	5	0,0257	0,0160	0,0167
	10	0,0293	0,0325	0,0325
	20	0,0268	0,0243	0,0289
	50	0,0104	0,0104	0,0104
	100	0,0131	0,0131	0,0131

TABLA 154

Valores de las velocidades iniciales relativas a la humedad inicial en lecho fluidizado
a altas temperaturas ($dH/H_0 d\theta = 0$)

		100°C		175°C		250°C	
		5 g	20 g	5 g	20 g	5 g	20 g
H ₁	650μ	0,0434	0,0361	0,0386	0,0574	0,0225	0,0693
	410	0,0678	0,0393	0,1850	0,1060	0,0352	0,0640
	265	0,0350	0,0233	0,2100	0,0756	0,0973	0,0819
H ₂	650μ	0,0746	0,0363	0,0764	0,0576	0,0226	0,0545
	410	0,0656	0,0819	0,1430	0,1100	0,0286	0,0714
	265	0,0295	0,0194	0,0825	0,0558	0,0611	0,1240
H ₃	650μ	0,0955	0,0362	0,0329	0,0609	0,0321	0,1090
	410	0,1660	0,1230	0,1830	0,1690	0,0226	0,1010
	265	0,0476	0,0408	0,1460	0,0612	0,0250	0,0737

TABLA 155

Niveles de significación del efecto de las variables sobre las velocidades
iniciales de secado a bajas temperaturas

VARIABLE	GRADOS DE LIBERTAD			GRADO DE SIGNIFICACION		
	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION
AD	4.16	59,75	99,9	4.30	20,8	99,9
TE	2.16	3,42	NO	2.30	1,2	NO
AD-TE	8.16	10,89	99,9	8.30	3,8	99,5
HU	2.16	8,40	99,5	-----	-----	-----
AD-HU	8.16	5,55	99,5	-----	-----	-----
TE-HU	4.16	2,17	NO	-----	-----	-----

TABLA 156

Niveles de significación del efecto de las variables sobre las velocidades iniciales
de secado a altas temperaturas

VARIABLE	GRADOS DE LIBERTAD			GRADO DE SIGNIFICACION		
	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION
AD	1.8	2,50	NO	1.36	1,28	NO
TE	2.8	0,32	NO	2.36	0,16	NO
CA-TE	2.8	0,18	NO	2.36	0,10	NO
TA	2.8	0,19	NO	2.36	0,10	NO
AD-TA	2.8	1,02	NO	2.36	0,52	NO
TE-TA	4.8	5,27	97,5	4.36	2,70	95
AD-TE-TA	4.8	1,97	NO	4.36	1,01	NO
HU	2.8	0,20	NO	----	----	----
AD-HU	2.8	0,27	NO	----	----	----
TE-HU	4.8	4,47	95	----	----	----
AD-TE-HU	4.8	1,78	NO	----	----	----
TA-HU	4.8	3,52	NO	----	----	----
AD-TA-HU	4.8	1,26	NO	----	----	----
TE-TA-HU	8.8	2,11	NO	----	----	----

TABLA 157

Niveles de significación del efecto de las variables sobre las velocidades iniciales de secado, relativas a las humedades iniciales y a bajas temperaturas

VARIABLE	GRADO DE SIGNIFICACION			GRADO DE SIGNIFICACION		
	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION
AD	4.16	145,30	99,9	4.30	63,08	99,9
TE	2.16	4,38	95,0	2.30	1,90	NO
AD-TE	8.16	13,02	99,9	8.30	5,65	99,9
HU	2.16	1,52	NO	----	----	----
AD-HU	8.16	4,92	99,5	----	----	----
TE-HU	4.16	2,66	NO	----	----	----

TABLA 158

Niveles de significación del efecto de las variables sobre las velocidades iniciales de secado, relativas a las humedades iniciales y a altas temperaturas

VARIABLE	GRADO DE LIBERTAD			GRADO DE LIBERTAD		
	GRADO DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION
AD	1.8	1,23	NO	1.36	0,36	NO
TE	2.8	42,29	99,9	2.36	12,61	99,9
AD-TE	2.8	32,90	99,9	2.36	9,81	99,9
TA	2.8	34,89	99,9	2.36	10,40	99,9
AD-TA	2.8	3,53	NO	2.36	1,05	NO
TE-TA	4.8	20,87	99,9	4.36	6,22	99,9
AD-TE-TA	4.8	5,06	97,5	4.36	1,51	NO
HU	2.8	6,16	97,5	----	----	----
AD-HU	2.8	3,04	NO	----	----	----
TE-HU	4.8	5,02	95	----	----	----
AD-TE-HU	4.8	2,19	NO	----	----	----
TA-HU	4.8	7,29	99	----	----	----
AD-TA-HU	4.8	3,11	NO	----	----	----
TE-TA-HU				----	----	----

- 209 -

se discute más adelante se ha de ser cauteloso a la hora de aceptar los mencionados efectos.

Aquí también como se puede apreciar en las tablas 157 y 158, la humedad inicial del producto aparece en un caso como variable no influyente y en el otro como variable de dudosa influencia, por ello en el estudio más concreto, se ha incorporado su variación y la de todas sus combinaciones, como parte del error total de la experimentación.

También, y como ya se hizo para el caso de transporte neumático, se ha realizado un nuevo análisis estadístico mo dificando el 2% de los datos obtenidos. Esta modificación (Tablas 159 a 166) no introduce ninguna mejora ni variación en los niveles de significación de las variables estudiadas, por ello de ahora en adelante no se tendrá en cuenta y siem pre se hará mención al estudio original con los datos reales obtenidos de la experimentación.

En el caso de lecho fluido y por razones que se explican posteriormente no puede aceptarse una interpretación de niveles de significación, tal como se hizo en transporte neumático y no aparece con sentido físico su tratamiento in dividual.

IV.3.9. Influencia de las variables estudiadas

De acuerdo con los valores que aparecen en las tablas 157 y 158 y si no se fuera más lejos en la interpretación, podrían marcarse unos efectos individuales como se ha hecho en el caso de transporte neumático.

Aparentemente existe una influencia del tamaño de grano y de la temperatura cuando se opera en una banda de temperaturas altas, es decir, entre 100 y 250°C, y no aparece influencia de la temperatura, pero sí de la adición, cuando

TABLA 159

Valores de las velocidades iniciales de secado a bajas temperaturas (Valores promediados: 3)

		<u>H₁</u>	<u>H₂</u>	<u>H₃</u>
45°C	5 g	0,00543	0,00343	0,00143
	10	0,00340	0,00423	0,00423
	20	0,00239	0,00199	0,00118
	50	0,00120	0,00120	0,00120
	100	0,00092	0,00092	0,00092
55°C	5	0,00219	0,00187	0,00152
	10	0,00471	0,00543	0,00543
	20	0,00302	0,00267	0,00254
	50	0,00176	0,00176	0,00176
	100	0,00135	0,00135	0,00135
65°C	5	0,00411	0,00189	0,00154
	10	0,00347	0,00299	0,00299
	20	0,00428	0,00287	0,00266
	50	0,00167	0,00167	0,00167
	100	0,00210	0,00210	0,00210

TABLA 160

Valores de las velocidades iniciales de secado a altas temperaturas
(Valores promediados: 2)

		100°C		175°C		250°C	
		5 g	20 g	5 g	20 g	5 g	20 g
H ₁	650μ	0,00610	0,00508	0,00497	0,00739	0,00366	0,01130
	410	0,00779	0,00452	0,02140	0,01220	0,00586	0,01060
	265	0,00368	0,00245	0,02570	0,00923	0,01730	0,01450
H ₂	650μ	0,00865	0,00422	0,00784	0,00590	0,00311	0,00751
	410	0,00659	0,00822	0,01120	0,00864	0,00350	0,00872
	265	0,00299	0,00196	0,00420	0,00284	0,00973	0,01380
H ₃	650μ	0,00738	0,03020	0,00309	0,00573	0,00304	0,01030
	410	0,01280	0,00945	0,01400	0,01290	0,00212	0,00947
	265	0,00323	0,00277	0,00588	0,00089	0,00216	0,00636

TABLA 161

Valores de las velocidades iniciales relativas a la humedad inicial a bajas temperaturas. (Valores promediados: 4)

		<u>H₁</u>	<u>H₂</u>	<u>H₃</u>
45°C	5 g	0,0340	0,0290	0,0156
	10 g	0,0287	0,0459	0,0373
	20 g	0,0150	0,0168	0,0128
	50 g	0,0075	0,0075	0,0075
	100 g	0,0059	0,0059	0,0059
55°C	5 g	0,0137	0,0158	0,0166
	10 g	0,0398	0,0589	0,0589
	20 g	0,0189	0,0226	0,0275
	50 g	0,0110	0,0110	0,0110
	100 g	0,0085	0,0085	0,0085
65°C	5 g	0,0257	0,0160	0,0167
	10 g	0,0293	0,0325	0,0325
	20 g	0,0268	0,0243	0,0289
	50 g	0,0104	0,0104	0,0104
	100 g	0,0131	0,0131	0,0131

TABLA 162

Valores de las velocidades iniciales relativas a la humedad inicial a altas temperaturas
(Valores promediados: 1)

		100°C		175°C		250°C	
		5 g	20 g	5 g	20 g	5 g	20 g
H ₁	650μ	0,0434	0,0361	0,0386	0,0574	0,0225	0,0693
	410	0,0678	0,0393	0,1850	0,1060	0,0352	0,0640
	265	0,0350	0,0233	0,1140	0,0756	0,0973	0,0819
H ₂	650μ	0,0746	0,0363	0,0764	0,0576	0,0226	0,0819
	410	0,0656	0,0819	0,1430	0,1100	0,0286	0,0545
	265	0,0295	0,0194	0,0825	0,0558	0,0611	0,1240
H ₃	650μ	0,0955	0,0362	0,0329	0,0609	0,0321	0,1090
	410	0,1660	0,1230	0,1830	0,1690	0,0226	0,1010
	265	0,0476	0,0408	0,1460	0,0612	0,0250	0,0737

TABLA 163

Niveles de significación del efecto de las variables sobre la velocidad inicial de secado a bajas temperaturas (Referidos a los valores de la tabla 159)

VARIABLE	GRADOS DE LIBERTAD			GRADO DE SIGNIFICACION		
		F			F	
AD	4.16	57,14		4.30	19,89	99,9
TE	2.16	2,36	NO	2.30	0,82	NO
AD-TE	8.16	10,36	99,9	8.30	3,60	99,5
HU	2.16	8,40	99,5	-----	-----	-----
AD-HU	8.16	5,58	99,5	-----	-----	-----
TE-HU	4.16	2,17	NO	-----	-----	-----

TABLA 164

Niveles de significación del efecto de las variables sobre la velocidad inicial de secado a altas temperaturas. (Referidos a los valores de la tabla 160)

VARIABLE	GRADOS DE LIBERTAD			F	GRADO DE SIGNIFICACION	
	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION	GRADOS DE LIBERTAD	F	GRADO DE SIGNIFICACION
AD	1.8	1,04	NO	1.36	0,24	NO
TE	2.8	1,02	NO	2.36	0,62	NO
AD-TE	2.8	4,40	NO	2.36	2,67	NO
TA	2.8	1,49	NO	2.36	0,91	NO
AD-TA	2.8	2,92	NO	2.36	1,70	NO
TE-TA	4.8	5,23	NO	4.36	3,17	NO
AD-TE-TA	4.8	0,32	NO	4.36	0,20	NO
HU	2.8	2,32	NO	-----	-----	-----
AD-HU	2.8	2,26	NO	-----	-----	-----
TE-HU	4.8	4,21	NO	-----	-----	-----
AD-TE-HU	4.8	0,40	NO	-----	-----	-----
TA-HU	4.8	3,27	NO	-----	-----	-----
AD-TA-HU	4.8	1,23	NO	-----	-----	-----
TE-TA-HU	8.8	0,70	NO	-----	-----	-----

TABLA 165

Niveles de significación del efecto de las variables sobre la velocidad inicial de secado, relativa a la humedad inicial y a bajas temperaturas (Referidos a los valores de la tabla 161)

VARIABLE	GRADO DE SIGNIFICACION			GRADO DE SIGNIFICACION		
	GRADOS DE LIBERTAD	F		GRADOS DE LIBERTAD	F	
AD	4.16	159,00	99,9	4.30	62,00	99,9
TE	2.16	5,70	97,5	2.30	2,24	NO
AD-TE	8.16	15,18	99,9	8.30	5,94	99,9
HU	2.16	1,64	NO	----	----	----
AD-HU	8.16	5,07	99,5	----	----	----
TE-HU	4.16	4,17	97,5	----	----	----

TABLA 166

Niveles de significación del efecto de las variables sobre la velocidad inicial de secado relativa a la humedad inicial y a altas temperaturas. (Referidos a los valores de la tabla 162)

VARIABLE	GRADOS DE LIBERTAD			GRADO DE SIGNIFICACION		
		F			F	
AD	1.8	0,10	NO	1.36	0,05	NO
TE	2.8	24,52	99,9	2.36	12,01	99,9
AD-TE	2.8	20,73	99,9	2.36	10,15	99,9
TA	2.8	27,56	99,9	2.36	13,50	99,9
AD-TA	2.8	1,10	NO	2.36	0,53	NO
TE-TA	4.8	15,58	99,9	4.36	7,63	99,5
AD-TE-TA	4.8	2,32	NO	4.36	1,14	NO
HU	2.8	5,90	NO	----	----	----
AD-HU	2.8	0,66	NO	----	----	----
TE-HU	4.8	2,63	NO	----	----	----
AD-TE-HU	4.8	1,67	NO	----	----	----
TA-HU	4.8	3,48	NO	----	----	----
AD-TA-HU	4.8	1,54	NO	----	----	----
TE-TA-HU	8.8	2,03	NO	----	----	----

se opera en la banda de temperaturas entre 45 y 65°C.

Todo esto podría ser lógico si se presentasen unos efectos físicamente aceptables, sin embargo al intentar desentrañar un poco más y conocer el tipo de influencia que las variables tienen sobre la velocidad de secado, aparecen unas secuencias de variación sin ninguna posible justificación.

Los valores medios de los distintos experimentos en que alguna variable común se ha mantenido constante, se recogen en las tablas 167 a 171. En las que el signo + adquiere una significación especial que no tenía en el caso de transporte neumático. Aquí la variación de la media sí puede considerarse como tal, y no como ocurre en los experimentos de transporte neumático en los que se da a título orientativo, puesto que en esta desviación se incluyen factores cuyos efectos no pueden englobarse en el error, ya que previamente se ha probado el efecto claramente significativo de las variables correspondientes.

Las consideraciones anteriores están basadas sobre la observación de las tablas 167 a 171 en las que puede verse cómo no aparece ninguna distribución permanente de la variación de la velocidad de secado con la temperatura o con el tamaño de grano. Por ello el único camino que aparece como posible explicación de los fenómenos observados, es la combinación del estimador elegido, la velocidad a tiempo cero, juntamente con la facilidad de distorsión que puede presentarse en el experimento, teniendo en cuenta una serie de hechos que más adelante se discuten.

La presencia de continuos puntos singulares en el valor de las medias de velocidades de secado, a los diferentes valores de las variables ensayadas, hacen pensar que durante la experimentación se pueden producir errores sistematizados que se dan en unas series de experimentos y en otras no.

TABLA 167

Variación de la velocidad de secado con la temperatura

INFLUENCIA DE LA ADICION		
TOTAL A AD 5g y AD 20 g		
100°C	0,0590	$\pm 0,0382$
175°C	0,0976	$\pm 0,0495$
250°C	0,0609	$\pm 0,0329$
PARCIAL A AD 5 g		
100°C	0,0695	$\pm 0,0420$
175°C	0,1115	$\pm 0,0574$
250°C	0,0385	$\pm 0,0251$
PARCIAL A AD 20 g		
100°C	0,0484	$\pm 0,0330$
175°C	0,0838	$\pm 0,0383$
250°C	0,0833	$\pm 0,0232$

TABLA 168

Variación de la velocidad inicial de secado
con la temperatura

INFLUENCIA DEL TAMAÑO

TOTAL A 650, 410 y 265 μ

100°C	0,0590 \pm 0,0382
175°C	0,0976 \pm 0,0495
250°C	0,0609 \pm 0,0320

PARCIAL A 650 μ

100°C	0,0536 \pm 0,0253
175°C	0,0539 \pm 0,0158
250°C	0,0517 \pm 0,0338

PARCIAL A 410 μ

100°C	0,0907 \pm 0,0462
175°C	0,1496 \pm 0,0353
250°C	0,0538 \pm 0,0303

PARCIAL A 265 μ

100°C	0,0326 \pm 0,0106
175°C	0,0893 \pm 0,0348
250°C	0,0772 \pm 0,0336

TABLA 169

Variación de la velocidad inicial de secado
con el tamaño de las partículas

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

TOTAL A 100°C, 175°C y 250°C

650 μ	0,0531 \pm 0,0245
410 μ	0,0980 \pm 0,0373
265 μ	0,0664 \pm 0,0368

PARCIAL A 100°C

650 μ	0,0536 \pm 0,0253
410 μ	0,0907 \pm 0,0462
265 μ	0,0326 \pm 0,0106

PARCIAL A 175°C

650 μ	0,0539 \pm 0,0158
410 μ	0,1496 \pm 0,0353
265 μ	0,0893 \pm 0,0348

PARCIAL A 250°C

650 μ	0,0517 \pm 0,0338
410 μ	0,0538 \pm 0,0303
265 μ	0,0772 \pm 0,0336

TABLA 170

Variación de la velocidad inicial de secado
con el tamaño de las partículas

INFLUENCIA DE LA ADICION		
TOTAL A AD 5g y AD 20 g		
650	0,0531	$\pm 0,0245$
410	0,0980	$\pm 0,0373$
265	0,0664	$\pm 0,0368$
PARCIAL A AD 5 g		
650	0,0487	$\pm 0,0265$
410	0,0998	$\pm 0,0690$
265	0,0710	$\pm 0,0421$
PARCIAL A AD 20 g		
650	0,0575	$\pm 0,0229$
410	0,0962	$\pm 0,0378$
265	0,0618	$\pm 0,0324$

TABLA 171

Variación de la velocidad inicial de secado
con la adición de carga húmeda al lecho de inerte

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

TOTAL A 45°C, 55°C y 65°C

AD5g	0,0203 \pm 0,0072
AD10g	0,0404 \pm 0,0117
AD20g	0,0215 \pm 0,0058
AD50g	0,0096 \pm 0,0016
AD100g	0,0091 \pm 0,0031

PARCIAL A 45°C

AD5g	0,0262 \pm 0,0095
AD10g	0,0373 \pm 0,0086
AD20g	0,0148 \pm 0,0020
AD50g	0,0075
AD100g	0,0059

PARCIAL A 55°C

AD5g	0,0153 \pm 0,0015
AD10g	0,0525 \pm 0,0110
AD20g	0,0230 \pm 0,0043
AD50g	0,0110
AD100g	0,0085

PARCIAL A 65°C

AD5g	0,0194 \pm 0,0054
AD10g	0,0343 \pm 0,0018
AD20g	0,0266 \pm 0,0023
AD50g	0,0104
AD100g	0,0131

Por otro lado el posible error sistematizado puede tener una gran influencia debido al tipo de estimador elegido, velocidad de secado a tiempo cero, medido como respuesta de un sistema durante los primeros instantes. Hay una serie lógica de factores que pueden provocar una extraordinaria distorsión del experimento sin posibilidad previa de control. A continuación se analizan con detalle las diferentes causas que se cree pueden hacer distorsionar los experimentos que se realicen en lecho fluidizado.

- 1) La forma de adición del producto al interior del lecho fluidizado, puede hacer que si está más o menos compactado emplee mayor o menor tiempo en caer y por tanto, sobre todo a altas temperaturas, se produzca un presecado durante el descenso.
- 2) La cantidad de producto inerte que permanece en el lecho después de estabilizarse las condiciones de operación, no es de hecho constante y por tanto la inercia del sistema es diferente de unos casos a otros.
- 3) La mezcla y transmisión de efectos está directamente ligada con el hecho de que el producto húmedo que se añade, esté más o menos disperso y caiga en una u otra zona del lecho.

Todo lo antedicho obliga a que no se pueda tomar ninguna decisión firme sobre la influencia de variables en lecho fluido en tanto en cuanto no se disponga de las garantías necesarias.

Especialmente, se ha de tener en cuenta que los mencionados efectos perturbadores, toman un significado especial debido a que la medida se refiere a la tendencia en los primeros instantes.

V. RESUMEN GENERAL Y CONCLUSIONES

V.1. INTRODUCCION

Dentro del resumen general se presenta primero una visión del conjunto de los métodos de cálculo que se han propuesto y utilizado para proyectar secaderos de transporte neumático, efectuando un estudio crítico de la imprecisión que tienen los supuestos de base que se emplean.

En segundo lugar se hace un estudio crítico de los resultados experimentales obtenidos.

Por último se presentan las conclusiones de mayor interés en relación con el estudio efectuado.

V.2. METODOS DE CALCULO EN EL PROYECTO DE SECADEROS DE TRANSPORTE NEUMATICO

Los métodos de cálculo de secaderos de transporte neumático descritos en la bibliografía, tratan el problema con un amplio conjunto de supuestos, que superponen incertidumbres en la decisión final de elegir un determinado tiempo de residencia para el material que se desea secar.

En primer lugar, se estima que la velocidad de las partículas corresponden a la diferencia entre la velocidad del aire y la calculada mediante la ecuación de Stokes. Esto sólo es aplicable a partículas esféricas, en movimiento no impedido por la presencia de más partículas. Además, esta va-

riante de cálculo no considera que dentro del tubo de arrastre neumático existe un perfil de velocidades que se deforma por la presencia de las partículas y que exige la definición correcta de la velocidad media.

Otra variante de cálculo utilizada, emplea la corrección de la velocidad evaluada para el transporte neumático de carbones, que define una modificación para la velocidad de arrastre en función de la esfericidad de las partículas. Esta corrección puede tener interés para materiales con superficie parecida a la del carbón pulverizado, aunque un estudio crítico de la forma en que se ha establecido esta corrección puede demostrar que no es rigurosa. En resumen, sólo puede tener interés para casos muy concretos y puede conducir a errores amplios en otros materiales.

La medida directa de la velocidad de las partículas en un secadero neumático presenta también dificultades. En la bibliografía consultada y en la parte experimental del presente trabajo se ha podido comprobar que la dispersión de medidas puede tener valores próximos al 100% y en algunos casos superarlos.

El tiempo de residencia de las partículas en el tubo de arrastre neumático, que ha de servir de base para evaluar coeficientes de transferencia de calor o de materia, hace que estos coeficientes tengan que estar afectados de límites de error del mismo orden de la dispersión obtenida para las velocidades. Este límite de error, aumenta para los coeficientes si además en su cálculo se introducen otros supuestos no rigurosos.

Así, la medida de la temperatura superficial de las partículas, se sustituye por la medida realizada recogiendo las partículas en un recinto en el que se ha colocado un termómetro. En este recinto la temperatura de cada partícu-

la tiene que evolucionar, igualándose su temperatura exterior con la interior y de esta forma la temperatura medida tiene un error por defecto.

La variación de la temperatura dentro del secadero de transporte neumático se supone lineal al representar la temperatura de entrada y la de salida, medida en la forma indicada anteriormente, en función de la longitud del tubo de arrastre neumático.

Los coeficientes de transferencia de calor se calculan en este supuesto, que evidentemente es una primera aproximación, pues no considera la evolución de la temperatura superficial en función del contenido del agua del producto. En relación con los coeficientes de transferencia de calor de/a las partículas en lecho fluidizado, al/del fluido que actúa en la transferencia, situación próxima al caso que se estudia, la bibliografía señala una gran falta de medidas. Botterill da la información limitada de que actualmente se puede disponer en casos muy concretos.

Los coeficientes de transferencia de materia se obtienen utilizando las temperaturas de las partículas establecidas en la forma indicada, para definir los valores de la presión de vapor del agua que se evapora, sin considerar su modificación posible por la forma en que se encuentra retenida por la superficie del sólido. Es evidente, por tanto, que los límites de error de los valores hallados son del mismo orden, por lo menos, de los correspondientes a los coeficientes de transferencia de calor.

En algunos casos se ha supuesto que la temperatura de la superficie de las partículas es la correspondiente a la ebullición del agua, y que además se adquiere instantáneamente.

Otra variante utiliza los coeficientes determinados a temperaturas del aire inferiores a 100° para los cálculos a

temperaturas en el intervalo 100-500°C.

En resumen puede decirse que a la dispersión de la medida de tiempos se une, para aumentar la cota de error, la utilización de los coeficientes de transferencia de calor o materia.

La determinación de velocidades de secado, obtenidas dando la variación de humedad, referida a cuerpo seco, en función del tiempo de residencia, está afectada sólo por la dispersión de la medida del tiempo de residencia y por ello aún siendo un tratamiento empírico del problema, puede ser más útil, si en su determinación se opera en el intervalo de variación de temperaturas en el que funcionará el secadero.

La variación de la velocidad de secado en función de la temperatura del aire, tamaño de partículas, y contenido de humedad se presenta por lo tanto como de gran interés para establecer las bases de proyecto de un secadero de transporte neumático.

La dispersión en la medida de tiempo de residencia matiza la determinación de esta función, en el sentido de comprobar si las tres variables estudiadas tienen o no una respuesta en la velocidad de secado, inferior, igual o superior a esta dispersión.

De acuerdo con lo expuesto, en el presente trabajo se ha prestado atención a la determinación del tiempo de residencia, así como a estudiar la influencia en la velocidad de secado de las variables, temperatura del aire, tamaño de partículas y contenido de humedad, interpretando los resultados desde el punto de vista estadístico.

Para sistematizar las conclusiones que pueden establecerse de acuerdo con los resultados experimentales obtenidos en el presente trabajo, a continuación se dan unos co-

mentarios sobre el tratamiento estadístico de los datos y posteriormente se ordenan las conclusiones presentando en primer lugar las correspondientes a las experiencias efectuadas en relación con el secado en transporte neumático, en segundo lugar en lecho fluidizado con la técnica de operación para obtener datos cinéticos en secado isoterma y por último las que en conjunto se establecen para mejorar los parámetros de proyecto de un secadero de transporte neumático.

V.3. ESTUDIO CRITICO DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS

El tratamiento que han de recibir los resultados de la experimentación obtenidos obligó a considerar una planificación previa de los experimentos, que permitió posteriormente la utilización de métodos estadísticos rigurosos.

Aún operando así, pueden aparecer influencias cuya explicación no sea fácil de probar, pero al menos se tiene la certeza del nivel de influencia relativo de la variable o conjunto de variables.

En el tratamiento de los resultados se ha procurado mantener el rigor estadístico para el análisis de los números obtenidos directamente. Más concretamente, para el estudio estadístico de velocidades medias y relativas en transporte neumático y para el ajuste de las curvas temperatura-tiempo en el caso de lecho fluidizado.

En este último aspecto de la investigación aparece la necesidad de relacionar variaciones de temperatura con variaciones de humedad, y para ello se acude a un balance que debido a la situación en transitorio del sistema no es totalmente riguroso en el entorno en el que se efectúa la medida.

Los resultados obtenidos a posteriori del balance, sufren de nuevo el rigor del método estadístico, para permitir la comparación con los ya obtenidos anteriormente.

La interpretación de las medias obtenidas tiene una doble vertiente, por un lado están los valores para los que se prueba que las variables no tienen influencia y para este caso la utilización es totalmente rigurosa.

Por otra parte, existen valores de medias obtenidos para observar la influencia de una variable y sobre los que si se prueba que hay un efecto claro de otra u otras variables. En este caso su interpretación es más dudosa, pero se considera como un hecho significativo que abre las puertas de futuras investigaciones.

Se puede considerar, por tanto, que los métodos estadísticos utilizados son fiables, y que se ha dado un tratamiento totalmente riguroso a los valores finales obtenidos, sin que esto quiera indicar que no se está en la conciencia de que las significaciones marcadas en algunos casos, puedan estar afectadas por la superposición de la influencia de otras variables.

V.3.1. Relación cuantitativa y cualitativa entre velocidades de secado medias en transporte neumático e iniciales en lecho fluidizado

El establecimiento de una relación cuantitativa entre las velocidades medias de secado en transporte neumático y lecho fluidizado puede ser una consideración que requiera una investigación sistematizada de productos de distinta naturaleza y no es además el objeto primordial de este trabajo en el que por sus especiales características se ha utilizado un solo producto, sulfato sódico. Sin embargo, la observación de las tablas dadas anteriormente indica que en

principio pueden admitirse velocidades del mismo orden o en todo caso, inferiores para el caso de las experiencias en lecho fluidizado.

V.3.2. Influencia comparativa de las variables estudiadas

Las variables que se han considerado aparecen en el caso de arrastre neumático como influyentes sobre la velocidad de secado media, sin embargo, este hecho no ha de hacer aceptar a priori que esta circunstancia se cumpla para todos los productos.

En el caso de lecho fluidizado no se presenta este comportamiento de la misma manera y parece que la facilidad de distorsión de los experimentos hace que no se aprecie con tanta rigurosidad el efecto de las distintas variables estudiadas.

V.3.3. Utilización de datos de secaderos de lechos fluidizados en el diseño de secaderos de transporte neumático

A la vista de los resultados de la experimentación puede decirse que los datos disponibles de secaderos de lecho fluidizado permiten discernir con bastante garantía, si un producto puede o no ser secado en transporte neumático y también obtenerse una idea del orden de la velocidad. En general, la velocidad inicial en secaderos de lecho fluidizado aparece inferior a la del mismo cuerpo secado a transporte neumático. Por tanto, un diseño basado en la velocidad que se obtenga en lecho fluidizado se puede considerar como conservador al pasar al diseño de un secadero de transporte neumático.

V.4. CONCLUSIONES

Cinética de secado en transporte neumático

- 1°) En productos en los que la humedad puede suponerse que se encuentra solo en la superficie de las partículas y en el intervalo de temperaturas entre 45 y 65°C, la variable temperatura tiene un efecto significativo sobre la velocidad de secado, pero no las variables humedad del producto y caudal de aire.
- 2°) En análogas circunstancias, en el intervalo de experimentación 100-250°C, puede considerarse que son significativas, diámetro, caudal y temperatura. En relación con esta última, ha de tenerse en cuenta que es más importante desde el punto de vista del balance térmico, para que, dada la alimentación de sólido, el aire, aporte la cantidad de calor necesaria para la evaporación del agua de forma que a la salida del tubo de arrastre, el aire tenga una temperatura superior o próxima a 100°C. El tiempo de secado es suficientemente corto para que no tenga ningún sentido la mejora que en el proyecto del secadero se puede tener al reducir la longitud del tubo de transporte neumático, aspecto que exigiría para determinarla una técnica de experimentación extraordinariamente fina, y un diseño de secadero difícilmente alcanzable que evitase el espectro de velocidades de las partículas en el tubo de transporte neumático.
- 3°) Las velocidades medidas presentan cotas de error relativo que son del orden del 50 al 100%. La causa de esta variación radica en la dispersión obtenida en las medidas del tiempo de residencia, que ponen de manifiesto la segregación de partículas en la corriente que las arrastra.

Cinética de secado en lecho fluidizado isoterma

- 4°) En los productos que pueda suponerse que la humedad se encuentra situada sólo en la superficie de las partículas, la velocidad de secado obtenida por cálculo con la técnica de experimentación del lecho isoterma en el intervalo de experimentación 45 a 65°C, así como en el intervalo 100-250°C, las variables, tamaño, humedad y temperatura no son significativas.
- 5°) Las velocidades iniciales de secado obtenidas en lecho fluidizado isoterma, para el mismo producto con el que se experimentó en secado en transporte neumático son del mismo orden de las velocidades de secado en arrastre neumático. Este hecho experimental puede justificarse en una primera aproximación, teniendo en cuenta las condiciones transitorias en que se efectúa la evaporación del agua.

Diseño de secaderos de transporte neumático

- 6°) En el proyecto de secaderos de transporte neumático, al tenerse en cuenta la cota de error de la velocidad de secado que se mide para determinar la longitud del tubo, se pone de manifiesto que siendo probable que el coste del tubo represente en general menos del 10% en el coste total de la instalación (tubo, soplante, sistema de calefacción, sistema de alimentación de sólidos, ciclón de separación y filtro de captación de polvo), se justifique que de todas las variantes descritas en la introducción deben de elegirse aquéllas que proporcionan un mayor tiempo de residencia.
- 7°) En las condiciones establecidas de elegir un diseño con mayor tiempo de resistencia, la experiencia en le-

cho fluidizado isoterma permite discernir si un determinado producto puede secarse en una instalación con arrastre neumático, así como definir las dimensiones fundamentales del secadero.

BIBLIOGRAFIA

VI.1. REFERENCIAS DEL TEXTO

1. Mc. CARTHY, H.E. y OLSON, J.H.- Ind. Eng. Chem. Fundam., 7, 471 (1968).
2. REDDY, K.V.S. y PEI, D.C.- Ind. Eng. Chem. Fundam., 8, 490 (1969).
3. SOO, S.L.; TREZEK, G.Y.; DIMICK, R.C. y HOHNSTREITER, G. F.- Ind. Eng. Chem. Fundam., 3, 98 (1964).
4. TOROBIN, L.B. y GAUVIN, W.H.- Can. J. Chem. Eng., 38, 142, 189 (1960).

VI.2. LIBROS

5. SEPARATION OF FLOW.- Chang, P.K.- Pergamon Press, Oxford, 1970.
6. PILOT PLANTS, MODELS, AND SCALE-UP METHODS IN CHEMICAL ENGINEERING.- Robert Edgeworth Johnstone and Meredith Wooldrige Thring.- Mc Graw-Hill, New Hork, 1957.
7. FLUIDIZATION.- Max Leva.- Mc. Graw Hill, London, 1959.
8. FLUIDIZED BED DRYING.- Vojtech Vanecek, Miroslav Markvart and Radek Drbohlav.- Leonard Hill, London, 1966.
9. FLUID BED HEAT TRANSFER.- J. Botterill.- Ed. Academic Press. New York, 1975.
10. EL SECADO.- Friedrich Kneule.- Urmo, Bilbao, 1966.
11. THE DESIGN AND ANALYSIS OF SCIENTIFIC EXPERIMENTS.- K.C. Peng.- Addison-Wesley Publishing, London, 1967.

12. ELEMENTOS DE INGENIERIA QUIMICA.- A. Vian y J. Ocon.- Editorial Aguilar, 1961.
13. DRYING OF SOLIDS IN THE CHEMICAL INDUSTRY.- G. Nonhebel y A.A.H. Moss.- Butterworth and Co. LTD. London, 1971.

VI.3. PUBLICACIONES

14. HEAT TRASFER DURING A FLASH DRYING PROCESS.- Stanley De brand.- Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop. Vol. 13, n° 4, 1974, pg. 396.
15. FUNDAMENTOS DEL SECADO NEUMATICO.- K.S. Sutherland.- B.C.E. Revista Lye de Química Industrial, marzo-abril, 1973, Vol. 6, n° 3-4, pg. 163.
16. A PERFORMANCE ESTIMATE OF A GRANULAR SOLIDS HEATER.- E.R. Ramaswamy y E.R. Gerhard.- British Chemical Engineering, Diciembre, Vol. 13, n° 12, 1968, pg. 1722.
17. SOME COMMENTS ON DRYER DESIGN.- C.G. Martin.- The Chemical Engineer, Julio, Agosto, 1973, pg. 367.
18. TEACHING AND RESEARCH IN CHEMICAL ENGINEERING.- J.F. Davison and D. Harrison.- The Chemical Engineer, Septiembre, 1966, pg. 211.
19. EFFECTIVE DRYING WITHOUT BULKY EQUIPMENT.- Werner and P. Fleiderer, Corp.- Chemical Engineering, June, 16, 1969, pg. 54.
20. CONVEYING AIR DRYERS.- Dr. Ing. K. Kröll.- Aufbereitungstechnik, n° 6, 1967, pg. 312.
21. MEDIDOR ELECTRONICO DE HUMEDAD ABSOLUTA.- V. Aleixandre y J.M. Guillen.- Revista de Ciencia Aplicada, n° 105, julio-agosto, 1965.
22. TURBULENT FLOW OF GAS-SOLIDS SUSPENSIONS.- H.E. Mc. Carthy y J.H. Olson.- I&C Fundamentals, Vol. 7, n° 3, agosto, 1968, pg. 471.
23. PNEUMATIC CONVEYING.- Mike Butler.- Chemical Processing, June, 1971.
24. DETERMINATION DE LA LONGUEUR DES SECHOIRS PNEUMATIQUES VERTICAUX.- Bozidar Perovic.- Chimie et Industrie-Genie Chimique, Vol. 98, n° 8, Novembre, 1967, pg. 1406.
25. PNEUMATIC DRYERS SURVEY REVISION.- British Chemical Engineering, September, 1969, Vol. 14, n° 9, pg. 1225.

26. FÖRDERLUFT-TROCKNER.- Dr. Ing. K. Kröhl.- Aufbereitung-
-Technik, n° 7, 1967, pg. 357.
27. AIR-SUSPENDED SYSTEMS.- Revisión.- Chemical Engineering,
June 19, 1967, pg. 171.
28. A SURVEY OF RECENT SOVIET RESEARCH ON THE DRYING OF SO-
LID.- G.D. Fulford.- The can. Jornal of Chem. Eng.,
agosto, 1969.

VI.4. CONSTRUCTORES DE SECADEROS DE LOS QUE HA OBTENIDO IN-
FORMACION DE CARACTERISTICAS DE EQUIPO

29. HAZEMAG.- Loddenheide 31.- 44 Münster/Westf.- Alemania.
30. KARL FISCHER.- 1 Berlin 27.- Alemania
31. KRAUSS-MAFFEI-IMPERIAL GMBH.- Taunenweg 4.- München.-
Germany.
32. SCHUMACHER'SCHE FABRIK.- Bietigheim/W.- Alemania.
33. MASCHINENFABRIK.- Friedrich Hass GmbH & CO. KG.- 5630
Remscheid-Lennep, Postfach 25.- Western Germany.
34. KARL FISCHER.- Holzhauser Str. 161-165.- 1 Berlin 27.-
Alemania.
35. MASCHINENFABRIK FRIEDRICH HAAS GmbH & CO.- Remscheid-Len-
nep.- Germany.
36. KRAUSS-MAFFEI-IMPERIAL GMBH.- Postfach 20 Obermenzing.-
8 München.- Germany.
37. ANHYDRO A/S.- 8, ØSTMARKEN.- Copenhagen-Søborg.- Den-
mark.
38. DAVENPORT MACHINE AND JOUNDRY COMPANY.- Davenport.-
Iowa.- U.S.A.
39. HARDINGE COMPANY.- York.- Pennsylvania 17405.- U.S.A.
40. RIETZ MANUFACTURING CO.- Santa Rosa.- California.- U.S.A.
41. ROTA-CONE BLENDERS & VACUUM DRYERS.- 147 Center Avenue.-
Little Falls, New Jersey.- U.S.A.
42. CARTER DAY COMPANY.- 655 Nineteenth Avenue N.E. Minnea-
polis.- Minn. 55418.- U.S.A.

43. FLASH DRYING.- Raymond Division.- Combustion Engineering Inc.- 427 West Randolph Street.- Chicago.- Illinois.- U.S.A.
44. BOWEN ENGINEERING, INC.- North Branch, New Jersey 08876.- U.S.A.
45. THE PATTERSON-KELLEY CO., INC.- Process Equipment Division.- East Stroudsburg.- Pennsylvania 18301.- U.S.A.
46. THE STRONG SCOTT MFG. CO.- 451 N.E. Taetstreet.- Minneapolis.- Minn. 55413.- U.S.A.
47. HARDINGE COMPANY INCORPORATED.- 240 Arch. ST.- New York.- Pennsylvania.- U.S.A.
48. RIETZ MANUFACTURING CO.- 150 Todd Road.- Santa Rosa.- California.- U.S.A.
49. CARPCO RESEARCH AND ENGINEERING, INC.- Jacksonville.- Florida 32206.- U.S.A.
50. TRAYLOR ENGINEERING & MANUFACTURING.- 1559 Mill Street.- Allentown, PA.- U.S.A.
51. DUCLONE DUST CONTROL EQUIPMENT.- 147 East Street.- Mineola, N.Y. 11501.- U.S.A.
52. J.P. DEVINE MANUFACTURING CO.- 49Th and A.V.R.R. Pittsburgh 1, PA.- U.S.A.
53. THE NATIONAL DRYING MACHINERY COMPANY.- Hancock Street and Lehigh Avenue.- Philadelphia.- Pennsylvania-19133.- U.S.A.
54. PULVERIZING MACHINERY.- Chatham Road. Summit.- New Jersey 07901.- U.S.A.
55. SUPERIOR PROCESSING EQUIPMENT.- Hopkins, Minnesota.- U.S.A.
56. WYSSMONT COMPANY INC.- 1470 Bergen Boulevard, Fort Lee.- New Jersey.- U.S.A.
57. THE BAUER BROS. CO.- Springfield.- Ohio.- U.S.A.
58. ARTHUR G. MCKEE & COMPANY.- 721 North B Street.- Sacramento.- California 95814.- U.S.A.
59. MINE AND SMELTER SUPPLY CO.- Manufacturing Division.- P.O. Box 16041. 3800 RACE ST.- Denver Colorado 80216.- U.S.A.

60. CENTRIFUGAL & MECHANICAL INDUSTRIES, INC.- 146 President Street.- St. Louis 18 Missouri.- U.S.A.
61. STEEL PROCESSING.- Post Office Box 751.- Butler, Pennsylvania 16001.- U.S.A.
62. PATTERSON DIVISION, PATTERSON INDUSTRIES, INC.- East Liverpool.- Ohio 43920.- U.S.A.
63. CALMIC ENGINEERING CO. LTD.- Grewe.- Cheshire.- Inglaterra.
64. KESTNER EVAPORATOR & ENGINEERING CO. LTD.- Greenhithe.- Kent.- Inglaterra.
65. SIMON-BARRON LIMITED.- Bristol Road.- Gloucester.- England.-
66. W.J. JENKINS & CO. LTD.- Beehive Works P.O. Box NO. 3. Retford.- Nottinghamshire.- England.
67. ANDREW.- St. Margarets House 57/59.- Victoria Street. London S.W.1.- Inglaterra.
68. GERICKET CO.- Regensdord-Zurich.- Suisse.